



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES**

CARRERA: INGENIERÍA FORESTAL

**INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN
CURRICULAR, MODALIDAD PROYECTOS DE
INVESTIGACIÓN**

TEMA:

**“Análisis multitemporal de los cambios de cobertura vegetal en áreas
susceptibles a incendios forestales en el área protegida Taita Imbabura”**

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Forestal

Línea de investigación: Desarrollo agropecuario y forestal sostenible

Autor: Dayana Maritza Pupiales Ichau

Director: Ing. Oscar Armando Rosales Enríquez, MSc.

Ibarra -abril– 2025



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO	
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1004213789
APELLIDOS Y NOMBRES:	Dayana Maritza Pupiales Ichau
DIRECCIÓN:	La Esperanza-Chirihuasi
EMAIL:	dmpupialesi@utn.edu.ec; dayanapupiales2001@gmail.com
TELÉFONO FIJO:	
	TELF. MÓVIL 0987605481

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	"Análisis multitemporal de los cambios de cobertura vegetal en áreas susceptibles a incendios forestales en el área protegida Taita Imbabura"
AUTOR:	Dayana Maritza Pupiales Ichau
FECHA: AAAAMMDD	2025/04/08
SOLO PARA TRABAJOS DE TITULACIÓN	
CARRERA/PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> GRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniera Forestal
DIRECTOR:	Ing. Oscar Armando Rosales Enríquez, MSc.

CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 08 días del mes de abril de 2025

EL AUTOR:



 Dayana Maritza Pupiales Ichau



CERTIFICACIÓN DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Ibarra, 08 de abril de 2025

Ing. Oscar Armando Rosales Enríquez, MSc.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

CERTIFICA:

Haber revisado el presente informe final del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que se ajusta a las normas vigentes de la Universidad Técnica del Norte; en consecuencia, autorizo su presentación para los fines legales pertinentes.


.....
Ing. Oscar Armando Rosales Enríquez, MSc.
C.C.: 0400933529



APROBACIÓN DEL COMITÉ CALIFICADOR

El Comité Calificado del Trabajo de Integración Curricular “Análisis multitemporal de los cambios de cobertura vegetal en áreas susceptibles a incendios forestales en el área protegida Taita Imbabura” elaborado por Dayana Maritza Pupiales Ichau, previo a la obtención del título del Ingeniera Forestal, aprueba el presente informe de investigación en nombre de la Universidad Técnica del Norte:

Ing. Osear Armando
Rosales Enríquez, MSc.
C.C.: 0400933529

Ing. Jorge Luis Ramírez
López, MSc.
C.C.: 1003081195



DEDICATORIA

Primeramente, a Dios por darme la oportunidad de estudiar una carrera universitaria, darme fortaleza en mi camino, llenarme de su fuerza para vencer todos los obstáculos que se me han presentado en este transcurso y brindarme la suficiente capacidad para cumplir esta meta, por a ver estado presente siempre en mi vida familiar y académica.

A mi madre María Zoila Ichau por ser mi mejor amiga y siempre motivarme a salir adelante por ser un gran apoyo en mi formación académica, por sus mejores consejos, su cariño y su paciencia, a mi padre José Valerio Pupiales por ser un buen hombre presente en todas mis situaciones cotidianas, por ser un excelente padre y ser un buen amigo por hacer todo el esfuerzo en trabajar sin importar lo cansado que este para que no nos haga falta nada en casa.

Dedico esto a mis padres que son los pilares fundamentales en mi vida por siempre estar conmigo y no dejarme sola por el esfuerzo que han hecho juntos para que pueda culminar mi carrera universitaria y ser un gran ejemplo para seguir siempre humildes y trabajadores, esto es gracias a ustedes por iluminar mi vida.

A Damián Pupiales por ser un hermano que me ha motivado a ser una mujer responsable e independiente por que ha logrado ser un ejemplo para seguir desde mi niñez por su apoyo moral y siempre motivarme a terminar la carrera para lograr ser una mejor profesional y a Pauleth

Pupiales mi hermanita pequeña que con su dulzura me ha dado apoyo emocional en mi momentos más estresantes que he tenido en este transcurso universitario que con su pequeña y temprana mentalidad logra que sea un ejemplo a seguir aplicada e inteligente y no menos importante a mi mejor amigo Bryan por estar presente en todo momento, demostrándome que su amistad sincera y por motivarme cada día a ser mejor que ayer.

Dayana Maritza Pupiales Ichau



AGRADECIMIENTO

En primer lugar, a mis adorados padres por el gran esfuerzo que han hecho sin importar las situaciones económicas por a ver confiado en mí, de lograr culminar una carrera universitaria gracias por los muchos sacrificios que han hecho por mí y mis hermanos de apoyar incondicionalmente en todas las situaciones.

A Dios, por bendecir mi hogar y guiar mi camino por siempre darme motivos para seguir adelante por brindarme la suficiente sabiduría para cumplir este objetivo gracias por todo lo bueno que me has dado en la vida por cumplir todas mis y agradeciéndote siempre por todo lo hermoso que me has brindado en mi vida.

Damián Pupiales mi adorado y amado hermano mayor que siempre ha sabido apoyarme en las materias que más dificultad he tenido por mostrarme que siempre debo llegar a la meta y no rendirme por protegerme de las malas amistades y aconsejarme en siempre obedecer a nuestros padres. A mi abuelita materna que siempre que puede ha sabido apoyarme económicamente para poder asistir a clases y giras académicas.

A mi querido director Oscar Rosales agradezco porque antes de ser mi docente ha sabido ser un buen amigo gracias por brindarme su apoyo y compartirme su conocimiento que ha sido de mucha utilidad para culminar titulación, por su paciencia y su tiempo gracias por orientarme para lograr ser una excelente profesional con la suficiente capacidad de defenderme en cualquier situación laboral en el futuro. A mi estimado asesor Jorge Ramírez por ser un excelente dirigente en mi formación por compartirme su sabiduría y tomarme en cuenta en su investigación, gracias por ser un excelente docente y un ejemplo para seguir como profesional por su inteligencia y responsabilidad, gracias por su motivación para lograr culminar esta investigación.

Dayana Maritza Pupiales Ichau



RESUMEN EJECUTIVO

En Ecuador, los incendios forestales han aumentado significativamente, causando pérdidas ecológicas, sociales y económicas. Sin embargo, el análisis multitemporal de las áreas susceptibles a incendios en el área protegida Taita Imbabura no ha sido realizado, lo que limita el desarrollo de estrategias de manejo y mitigación. Este estudio evalúa los cambios en la cobertura vegetal en zonas vulnerables a incendios utilizando imágenes satelitales Landsat y datos geospaciales del MAATE. Se identificaron áreas vulnerables y se analizaron patrones de cambio y recuperación de la vegetación afectada. Para determinar la susceptibilidad a incendios, se ponderaron variables como pendiente, uso del suelo, cobertura vegetal, altitud, orientación del terreno y velocidad del viento. Además, se utilizó el índice de vegetación (NDVI) para evaluar la salud de la vegetación y el índice de incendios (NBR) para identificar áreas quemadas, complementadas con Análisis Jerárquico de Proceso para priorizar áreas vulnerables. Los resultados obtenidos mostraron que entre 2014 y 2023, la susceptibilidad a incendios forestales en el área protegida Taita Imbabura varió multitemporalmente, las áreas de alta susceptibilidad, destacadas por pendientes escarpadas y páramo, pasaron de 3481,26 ha en 2014 a 2379,16 ha en 2023. En el año 2013 los valores obtenidos del índice de vegetación varían entre -0.016 y 0.540, mientras que el año 2023 los valores del índice de vegetación obtenidos varían entre -0.008 y 0.530, lo que indica que no hubo mayor variación en el NDVI multitemporal. El cálculo del NBR reportó una superficie total de 534.42 ha en los años 2017, 2020, 2022.

Palabras clave: Análisis multitemporal, índice de vegetación, índice de incendios, Taita Imbabura, susceptibilidad de incendios.



ABSTRACT

In Ecuador, forest fires have increased significantly, causing ecological, social, and economic losses. However, the multitemporal analysis of fire-susceptible areas in the Taita Imbabura protected area has not been conducted, limiting the development of management and mitigation strategies. This study evaluates changes in vegetation cover in fire-prone areas using Landsat satellite images and geospatial data from MAATE. Vulnerable areas were identified, and patterns of change and vegetation recovery were analyzed.

To determine fire susceptibility, variables such as slope, land use, vegetation cover, altitude, terrain orientation, and wind speed were weighted. Additionally, the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) was used to assess vegetation health, and the Normalized Burn Ratio (NBR) was employed to identify burned areas. These were complemented with an Analytical Hierarchy Process (AHP) to prioritize vulnerable areas.

The results showed that between 2014 and 2023, fire susceptibility in the Taita Imbabura protected area varied multitemporally. High-susceptibility areas, characterized by steep slopes and páramo, decreased from 3,481.26 ha in 2014 to 2,379.16 ha in 2023. In 2013, NDVI values ranged from -0.016 to 0.540, while in 2023, they ranged from -0.008 to 0.530, indicating no significant variation in the multitemporal NDVI. The NBR calculation reported a total affected area of 534.42 ha in the years 2017, 2020, and 2022.

Keywords: Multitemporal analysis, vegetation index, fire index, Taita Imbabura, fire susceptibility.



LISTA DE SIGLAS

AHP. Proceso analítico jerárquico

AUC. Área bajo la curva

BAI. Índice de área calcinada

BCN. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile

CONAF. Corporación Nacional Forestal

ETM. Enhanced Thematic Mapper (Mapeador temático mejorado)

FODA. Fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas

GIF. Grandes incendios forestales

INAMHI. Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología – Ecuador

IGM. Instituto Geográfico Militar

MAATE. Ministerio del Ambiente del Ecuador.

MAG. Ministerio de Agricultura y Ganadería

MODIS. Espectro radiómetro de Imágenes de Resolución Moderada (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)

NBR. Índice Normalizado de Área Quemada

NDVI. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada

NIR. Infrarrojo cercano

ONEMI. Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior y Seguridad Pública

OLI. Operational Land Imager (Generador operacional de imágenes terrestres)

USGS. United States Geological Survey (Servicio Geológico de los Estados Unidos)



SGR. Secretaria de Gestión de Riesgos

SIG. Sistemas de información geográfica

SWIR. Infrarrojo de onda corta

RF. Radio frecuencia

ROC. Curva de característica operativa del receptor



ÍNDICE DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN	20
Problema de investigación.....	20
Justificación	21
Objetivos.....	23
Objetivo General.....	23
Objetivos Específicos	23
Preguntas de investigación	23
CAPÍTULO I	24
MARCO TEÓRICO	24
1.1. Incendios Forestales	24
1.1.1. El triángulo del fuego	24
1.1.2. Causas de los incendios forestales.....	24
1.1.3. Causas estructurales.....	24
1.1.4. Causas inmediatas	25
1.1.5. Consecuencias socioeconómicas y ecológicas	26
1.1.6. Comportamiento del fuego	27
1.2. Susceptibilidad de incendios forestales.....	28
1.2.1. Incendios forestales en áreas protegidas	28
1.2.2. Análisis multitemporal de incendios forestales.....	28
1.3. Recuperación de cobertura vegetal después de incendios forestales.....	29
1.3.1. Patrones de cambio de la vegetación.....	29
1.3.2. Índices de incendios mediante imágenes satelitales	30
1.3.3. Patrones de recuperación de la vegetación	31
1.4. Multi temporalidad de las ocurrencias de incendios forestales	32
1.4.1. Multi temporalidad de incendios forestales en Ecuador.....	32
1.4.2. Análisis de incendios forestales a través de SIG	33
1.5. Investigaciones similares	33
1.5.1. Susceptibilidad para incendios de cubierta vegetal: una evaluación desde los métodos multicriterio y radiofrecuencia (Cantón Cotacachi, Ecuador).....	34
1.5.2. Análisis de zonas susceptibles a incendios de cobertura vegetal de la reserva ecológica “El Ángel”, provincia del Carchi	34
1.5.3. Determinación de la susceptibilidad a incendios de cobertura vegetal en la estación biológica Guandera	34
1.5.4. Análisis multitemporal de áreas de cobertura vegetal incendiadas en el cantón Ibarra	35



1.5.5. Zonificación de cobertura vegetal propensa a incendios en el cantón Cotacachi provincia de Imbabura.....	35
1.5.6. Análisis multitemporal de los cambios de la cobertura vegetal provocados por incendios forestales en San José de Minas, periodo 2012-2018	36
CAPÍTULO II.....	37
MATERIALES Y MÉTODOS.....	37
2.1. Tipo de investigación según los siguientes criterios:	37
2.2. Ubicación del lugar	37
2.3. Caracterización edafoclimática del lugar	38
2.4. Materiales, equipos y software	39
2.5. Métodos, técnicas e instrumentos.....	39
2.5.1. Universo-población:.....	39
2.5.2. Tamaño de la muestra:	40
2.5.3. Muestreo:	40
2.5.4. Trabajo a desarrollar en gabinete y campo	40
2.6. Variables de estudio	40
2.6.1. Ecuación de suma ponderada.....	43
2.6.2. Para el cálculo del índice de vegetación se aplicó la siguiente fórmula:	44
2.6.3. Para el cálculo de índice de incendios se aplicó la siguiente fórmula:	44
2.7. Procedimiento y análisis de datos.	44
2.7.1. Determinación de las áreas susceptibles a incendios forestales en el área protegida Taita Imbabura.	44
2.7.2. Evaluación de los patrones de cambio y recuperación de la vegetación en las áreas afectadas por incendios forestales en las áreas identificadas como susceptibles.....	51
CAPÍTULO III	53
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	53
3.1. Categorización de variables topográficas, antrópicas y climáticas que influyen en la susceptibilidad de incendios forestales	53
3.2. Ponderación de las variables topográficas, antrópicas y climáticas que inciden en la susceptibilidad de incendios forestales	54
3.2.1. Factores antrópicos	55
3.2.2. Uso del suelo.....	65
3.3. Factores topográficos	75
3.4. Factores climáticos	79
3.5. Susceptibilidad temporal de incendios forestales.....	80
3.5.1. Susceptibilidad 2014	80
3.5.2. Susceptibilidad 2015	82



3.5.3. Susceptibilidad 2016	84
3.5.4. Susceptibilidad 2017	85
3.5.5. Susceptibilidad 2018	87
3.5.6. Susceptibilidad 2019	88
3.5.7. Susceptibilidad 2020	90
3.5.8. Susceptibilidad 2022	92
3.5.9. Susceptibilidad 2023	93
3.6. Evaluación de los patrones de cambio y recuperación de la vegetación en las áreas afectadas por incendios forestales	97
3.6.1. Índice de vegetación (NDVI)	97
3.6.2. Evaluación de patrones de cambio	105
3.7.1. Recuperación de la vegetación	110
3.8. Validación de la clasificación supervisada	113
3.9. Curva ROC	115
CAPÍTULO IV	118
Conclusiones y recomendaciones	118
4.1. Conclusiones	118
4.2. Recomendaciones	119
Referencias Bibliográficas	120
Anexos	126



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Coordenadas del área de estudio (WGS84 UTM 17S)	37
Tabla 2. Materiales, equipos y software a emplear en la investigación.....	39
Tabla 3. Clasificación de susceptibilidad.....	41
Tabla 4. Susceptibilidad cobertura vegetal	41
Tabla 5. Susceptibilidad uso del suelo	42
Tabla 6. Susceptibilidad altitud del terreno	42
Tabla 7. Susceptibilidad orientación del terreno.....	42
Tabla 8. Susceptibilidad pendiente	42
Tabla 9. Susceptibilidad velocidad del viento	43
Tabla 10. Listado de imágenes Landsat 8 y archivos de uso de suelo y cobertura vegetal	45
Tabla 11. Pesos asignados a las variables	49
Tabla 12. Matriz de confusión	52
Tabla 13. Variables que influyen en la susceptibilidad de incendios	53
Tabla 14. Cobertura vegetal anual	64
Tabla 15. Variación del uso de suelo	74
Tabla 16. Rango de pendientes del terreno	76
Tabla 17. Susceptibilidad 2014	82
Tabla 18. Susceptibilidad 2015	84
Tabla 19. Susceptibilidad 2016.....	85
Tabla 20. Susceptibilidad 2017	87
Tabla 21. Susceptibilidad 2018.....	88
Tabla 22. Susceptibilidad 2019	90
Tabla 23. Susceptibilidad 2020.....	92



Tabla 24. Susceptibilidad 202293

Tabla 25. Susceptibilidad 202395

Tabla 26. Valores de NDVI máximo y mínimo por año106

Tabla 27. NBR 2017-2020-22108

Tabla 28. Recuperación de vegetación112

Tabla 29. Matriz de confusión114

Tabla 30. Valoración del coeficiente Kappa115



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación del Área Protegida "Taita Imbabura"	38
Figura 2. Proceso para la corrección de imágenes Landsat	47
Figura 3. Procesos para la clasificación supervisada.....	48
Figura 4. Proceso para el cálculo del NDVI	50
Figura 5. Proceso para el cálculo del NBR	51
Figura 6. Cobertura vegetal 2014	55
Figura 7. Cobertura vegetal 2015	56
Figura 8. Cobertura vegetal 2016	57
Figura 9. Cobertura vegetal 2017	58
Figura 10. Cobertura vegetal 2018	59
Figura 11. Cobertura vegetal 2019	60
Figura 12. Cobertura vegetal 2020	61
Figura 13. Cobertura vegetal 2022	62
Figura 14. Cobertura vegetal 2023	63
Figura 15. Uso del suelo 2014	65
Figura 16. Uso del suelo 2015	66
Figura 17. Uso del suelo 2016	67
Figura 18. Uso del suelo 2017	68
Figura 19. Uso del suelo 2018	69
Figura 20. Uso del suelo 2019	70
Figura 21. Uso del suelo 2020	71
Figura 22. Uso del suelo 2022	72
Figura 23. Uso del suelo 2023	73



Figura 24. Pendientes del área protegida Taita Imbabura	76
Figura 25. Altitud del área protegida Taita Imbabura	77
Figura 26. Orientación del terreno	79
Figura 27. Velocidad del viento.....	80
Figura 28. Susceptibilidad a incendios forestales 2014.....	82
Figura 29. Susceptibilidad a incendios forestales 2015.....	83
Figura 30. Susceptibilidad a incendios forestales 2016.....	85
Figura 31. Susceptibilidad a incendios forestales 2017	86
Figura 32. Susceptibilidad a incendios forestales 2018.....	88
Figura 33. Susceptibilidad a incendios forestales 2019	89
Figura 34. Susceptibilidad a incendios forestales 2020.....	91
Figura 35. Susceptibilidad a incendios forestales 2022.....	93
Figura 36. Susceptibilidad a incendios forestales 2023.....	94
Figura 37. NDVI 2013	98
Figura 38. NDVI 2015	99
Figura 39. NDVI 2016.....	100
Figura 40. NDVI 2017	101
Figura 41. NDVI 2019	102
Figura 42. NDVI 2020	103
Figura 43. NDVI 2022	104
Figura 44. NDVI 2023.....	105
Figura 45. Índice de incendio (NBR) 2017.....	108
Figura 46. Índice de incendio (NBR) 2020.....	109
Figura 47. Índice de incendio (NBR) 2022.....	110
Figura 48. Recuperación del 2017 entre 2019	111



Figura 49. Recuperación del NBR 2020 entre 2023111

Figura 50. Recuperación del NBR 2022 entre 2023112

Figura 51. Curva ROC 2017116

Figura 52. Curva ROC 2020116

Figura 53. Curva ROC 2022117



INTRODUCCIÓN

El estudio analiza la susceptibilidad a incendios forestales en el área protegida Taita Imbabura y su zona de amortiguamiento, ubicada en Ecuador, provincia de Imbabura y cantón Ibarra, identificando los factores topográficos, climáticos y antrópicos que influyen en estos eventos. Las variables como la cobertura vegetal, pendiente, altitud, orientación del terreno, velocidad del viento y uso del suelo fueron evaluadas y ponderadas para determinar su impacto en la ocurrencia y propagación de incendios. A través de un enfoque multitemporal, se evidencian cambios significativos en las coberturas vegetales entre 2013 y 2023, así como patrones de recuperación en áreas afectadas por incendios. La Secretaría de Gestión de Riesgo (2023) plantea que este análisis busca contribuir a la gestión sostenible del territorio y a la implementación de estrategias efectivas de prevención y mitigación de riesgos.

Problema de investigación

- Problemática a investigar

En el Ecuador, el Ministerio del Ambiente (2016) expone que el problema de los incendios forestales se ha agravado significativamente en los últimos años, causando enormes pérdidas y devastaciones sociales, económicas y ecológicas en diversas provincias, este incremento en la incidencia de incendios forestales afecta especialmente a aquellas áreas con mayor potencial para la prevención y mitigación de incendios el cual este fenómeno subraya la necesidad de implementar estrategias de gestión más efectivas.

El daño ecológico causado por los incendios forestales ha impactado tanto a los bosques como a los páramos. Se observan cambios significativos en el ciclo hidrológico, que inciden directamente en el agotamiento de los recursos hídricos al reducir la infiltración y recarga hídrica, además del agotamiento de la humedad del suelo y el aumento de la erosión eólica e hídrica (BCN, 2017).



Estos efectos adversos resaltan la importancia de un estudio detallado sobre la susceptibilidad de los incendios forestales para diseñar medidas de mitigación efectivas.

En el sector agrícola, frecuentemente se producen grandes incendios sin supervisión, siendo los bosques una de las principales víctimas de estos eventos. Los incendios forestales y las quemas agrícolas han aumentado en los últimos años, afectando a muchas zonas del país. La región de Sierra ha registrado el mayor número de incidentes, lo que indica una alta vulnerabilidad en esta área. Es crucial identificar y estudiar las zonas susceptibles a incendios forestales dentro del área protegida Taita Imbabura, ya que no han sido investigadas adecuadamente debido a la ausencia de estudios previos sobre los impactos específicos.

Por lo tanto, es imperativo realizar investigaciones exhaustivas sobre la susceptibilidad a incendios forestales en áreas protegidas como el Taita Imbabura. Esto permitirá desarrollar estrategias de manejo y prevención más efectivas, contribuyendo a la conservación de la biodiversidad y la protección de los recursos naturales, así como a la seguridad de las comunidades locales.

- Formulación del problema de investigación

La variación multitemporal de las áreas susceptibles a incendios forestales en el área protegida Taita Imbabura no ha sido adecuadamente estudiada, lo que limita la comprensión de los factores que contribuyen a la susceptibilidad y a la frecuencia de estos eventos. Esta falta de conocimiento impide el desarrollo e implementación de estrategias de manejo y mitigación efectivas, necesarias para proteger los ecosistemas vulnerables y las comunidades locales que dependen de ellos.

Justificación

La presente investigación, responderá a la necesidad e interés de generar información que pueda ser útil para las autoridades del área protegida Taita Imbabura en la toma de decisiones para la prevención y/o mitigación de incendios de cobertura vegetal, además de que la misma metodología



a utilizarse en la zona de estudio pueda ser aplicada en otras zonas del país y áreas protegidas que se ven afectadas por los incendios forestales.

Los incendios forestales representan una amenaza constante para la biodiversidad, los recursos naturales y la seguridad de las comunidades locales (Moore, 2001). En el área protegida Taita Imbabura, la conservación de la flora y fauna es de suma importancia, y la comprensión de la susceptibilidad a los incendios es fundamental para implementar medidas de prevención y manejo adecuadas.

Además, esta investigación proporcionará información valiosa para el desarrollo de políticas y acciones que protejan este importante patrimonio natural, promoviendo así la sostenibilidad ambiental y socioeconómica de la región. Los resultados obtenidos en la investigación aportarán con una base para el manejo del área protegida para ordenar los ecosistemas, así mismo para tener un monitoreo de las áreas que necesitan más prevención a los incendios el cual tendrá como finalidad brindar información a las comunidades y proteger a la población local y a los visitantes. A nivel regional y provincial esta investigación será útil para los Gobiernos Autónomos Descentralizados para la gestión ambiental, ordenamiento territorial y la toma de decisiones oportunas. Con los resultados se generará una línea base para futuras investigaciones de susceptibilidad de incendios forestales de áreas protegidas ubicadas en la zona andina Norte del Ecuador. Para la ejecución de la investigación se cuenta con los medios suficientes como cartografía base y temática, registros históricos, además existe varias experiencias en estudios similares por lo que la metodología está claramente definida.

Este estudio proporcionará información para el desarrollo de estrategias efectivas de prevención y mitigación de incendios en áreas protegidas, beneficiando tanto a la biodiversidad como a las comunidades locales. Además, se proporcionará información que puede ser empleada para la actualización de los Planes de Desarrollo y Ordenamiento Territorial cantonales y parroquiales,



donde los actores locales y pobladores podrán mitigar los incendios que ocurran en áreas susceptibles.

Objetivos

Objetivo General

Analizar los cambios en la cobertura vegetal en áreas susceptibles a incendios forestales en el área protegida Taita Imbabura.

Objetivos Específicos

- Determinar las áreas susceptibles a incendios forestales en el área protegida Taita Imbabura.
- Evaluar los patrones de cambio y recuperación de la vegetación en las áreas afectadas por incendios forestales en las áreas identificadas como susceptibles.

Preguntas de investigación

- ¿Cuáles son las áreas específicas dentro del área protegida Taita Imbabura que presentan mayor susceptibilidad a incendios forestales?
- ¿Cómo ha variado la distribución espacial y temporal de los incendios forestales en el área protegida Taita Imbabura en los últimos años?
- ¿Cuáles son los patrones de cambio y recuperación de la vegetación en las áreas quemadas del área protegida Taita Imbabura?



CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.1. Incendios Forestales

1.1.1. El triángulo del fuego

El fuego es un elemento natural importante para el mantenimiento de la diversidad biológica de la Tierra y ha sido utilizado por el ser humano durante años, principalmente como técnica para el desarrollo agrícola. Sin embargo, cuando el fuego no se controla adecuadamente, se vuelve incontrolable, dando lugar a incendios que causan daños y pérdidas ambientales, sociales y económicas (Díaz y Encarnación, 2018).

Acosta (2021) comenta que el triángulo de fuego o triángulo de combustión es un modelo que explica los tres componentes necesarios para que se inicie la mayoría de los incendios: un combustible, oxígeno y una fuente de calor suficiente para desencadenar la reacción. Cuando estos tres elementos están presentes en las proporciones adecuadas, se produce el fuego.

Es fundamental entender el balance entre el uso controlado del fuego y su potencial destructivo para la planificación y gestión ambiental efectiva. El fenómeno del fuego se produce cuando el oxígeno del aire se mezcla con cualquier sustancia combustible en el proceso de combustión, liberando gases, calor y luz, y muchas veces llamas (Mata, 2011).

1.1.2. Causas de los incendios forestales

Actualmente, hay varias razones que provocan incendios forestales. Es fundamental identificar estas causas para poder implementar las acciones y medidas preventivas necesarias. La mayoría de los expertos coinciden en clasificar estas causas en dos categorías: estructurales (clima, vegetación y actividad humana) e inmediatas (naturales y antrópicas).

1.1.3. Causas estructurales



Son aquellas causas correspondientes a las condiciones permanentes, ecológicas y sociológicas que determinan la problemática con carácter general. Es importante conocer y analizar exhaustivamente las causas más frecuentes de los incendios para poder adoptar instrumentos y medidas eficientes de prevención.

- *Clima*

Las condiciones meteorológicas típicamente vinculadas al clima de incendios forestales incluyen la temperatura del aire, la humedad relativa, la velocidad del viento y la precipitación. Estas variables están influenciadas por patrones climáticos de amplia escala (Pazmiño, 2020).

- *Vegetación*

La vegetación, que incluye plantas silvestres o cultivadas en tierra o agua, se refiere a la cobertura vegetal. Su distribución depende del clima y los suelos, mostrando una fuerte relación entre vegetación y condiciones climáticas (Cariasco, 2014).

- *Actividad humana*

La quema de vegetación por el ser humano tiene orígenes antiguos y ha sido utilizada históricamente para regenerar pastos, eliminar especies dañinas y preparar tierras para cultivos. Actualmente, esta práctica continúa en regiones tropicales por pequeños productores, campesinos e indígenas para expandir áreas agrícolas (Martínez Fernández y Martínez Vega, 2004).

1.1.4. Causas inmediatas

“Son aquellas que originan directa y puntualmente un incendio forestal. Dentro de esta podemos distinguir entre las causas naturales y causas antrópicas” (Sánchez, 2015).

- *Naturales*

Plana, Font, y Serra (2016) expresan que “El fuego es una perturbación natural común en la mayoría de los ecosistemas. La vegetación mediterránea ha desarrollado estrategias para



sobrevivir, como cortezas gruesas, capacidad de rebrote y piñas serótinas que requieren calor para liberar semillas, germinando en suelo quemado”.

- *Antrópicas*

El Gobierno de España (2020) indica que “Los riesgos antrópicos son aquellos generados por la actividad humana y sus impactos en la naturaleza, como la contaminación del agua, aire y suelo, la deforestación y los incendios. Son originados por la presencia humana y su conducta social o intencionada”.

Los incendios forestales y las quemas agrícolas representan una de las perturbaciones antrópicas más significativas que impactan a los bosques en todo el globo. En diversas naciones y zonas geográficas, como la región mediterránea, estos eventos ejercen la mayor influencia sobre la cobertura arbórea, la cual puede experimentar reducciones temporales e incluso pérdidas irreversibles.

Las transformaciones demográficas, agrícolas y climáticas están modificando las perspectivas en la gestión de los incendios forestales. Además, el cambio climático parece estar afectando los patrones de precipitación y clima, lo que puede intensificar los daños ocasionados por los incendios (Collins, De Neufville, Claro, Oliveira, y Pacheco, 2013).

1.1.5. Consecuencias socioeconómicas y ecológicas

Según Valenzuela (2011) los incendios forestales causan serios daños ecológicos, incluyendo la destrucción de la cubierta vegetal, la muerte y desplazamiento de animales, la pérdida de suelo fértil, el aumento de la erosión, la desaparición de ecosistemas, el incremento de las emisiones de CO₂ a la atmósfera y la desertificación.

En términos socioeconómicos, afectan la salud pública, dañan propiedades tanto públicas como privadas, interrumpen los procesos productivos y reducen las fuentes de empleo, entre otros



efectos. Por esta razón, instituciones gubernamentales como CONAF y ONEMI trabajan cada año para promover el compromiso de la comunidad en la protección contra incendios forestales.

1.1.6. Comportamiento del fuego

El comportamiento del fuego y la evolución de un incendio dependen de varios factores, conocidos como el "Triángulo del comportamiento del fuego" y se agrupan del modo siguiente: - Los combustibles vegetales.

- Los factores climatológicos.
- La topografía del terreno.

Los combustibles vegetales son esenciales para que el fuego ocurra. Sus características, como tamaño, distribución y humedad, determinan cómo se comportará el fuego.

Además, los combustibles son el único factor que el ser humano puede manipular para controlar o extinguir un incendio. Los factores climatológicos influyen en los combustibles a través de la humedad y la temperatura, y afectan la propagación del fuego mediante el viento. La topografía, el factor más constante, modifica las características de los combustibles y del clima (WordPress, 2016, pág. 7).

Estudios recientes han identificado un nuevo factor en los grandes incendios forestales (GIF): el ambiente de fuego, donde el incendio crea sus propias condiciones meteorológicas. Así, el "Triángulo del comportamiento del fuego" se convierte en el "Tetraedro del comportamiento del fuego". La cantidad de personas en una zona determina en gran medida la probabilidad de que se desate un incendio. Aunque los rayos son una causa potencial, el clima ecuatoriano no favorece los incendios de origen natural como ocurre en las sabanas africanas.

Según la Fundación Charles Darwin (2013) "el cambio diario de temperatura favorece un aumento de la intensidad del fuego, que es mayor cuanto más calor hace. Por el contrario, cuando cae la



noche, la temperatura baja y el fuego pierde su intensidad hasta que vuelve el calor al día siguiente” (pág. 41).

1.2. Susceptibilidad de incendios forestales

1.2.1. Incendios forestales en áreas protegidas

Los incendios forestales en áreas protegidas a menudo son causados por actividades humanas, ya sea de manera accidental o intencional. Estos incendios pueden originarse por desigualdades sociales, falta de propiedad de la tierra, falta de conocimiento sobre el uso correcto del fuego y una gestión inadecuada de las quemas agropecuarias (Moraga, 2017).

Cassidy, Perkins, y Bradley (2022) menciona que los incendios forestales anuales intensos están causando la "sabanización" de vastas áreas de bosques en reservas forestales, áreas protegidas y zonas silvestres adyacentes. La falta de información sobre el régimen actual de incendios dificulta la implementación de medidas de gestión. Sin embargo, al utilizar datos sobre incendios obtenidos del satélite MODIS, es posible identificar la frecuencia y la estacionalidad de estos incendios.

En Imbabura 1472,71 hectáreas de cobertura vegetal han sido afectadas por 198 incendios forestales registrados hasta el 5 de septiembre de 2015; el cantón Ibarra registró el mayor número de eventos (58), seguido del cantón Otavalo con (36). El incendio en el cerro Imbabura, que tomó 27 horas para ser controlado, comenzó el 1 de octubre de 2023 y terminó al día siguiente, consumiendo un área total de aproximadamente 40 hectáreas (SGR, 2023). Este evento subraya la importancia de la preparación y respuesta rápida ante incendios forestales en áreas protegidas. El MAATE (2021) señala que el área protegida Taita Imbabura garantiza la conservación de recursos naturales y del patrimonio cultural de la provincia de Imbabura, beneficiando a 75.000 habitantes de 3 cantones: Ibarra, Otavalo, y Antonio Ante, y 11 parroquias.

1.2.2. Análisis multitemporal de incendios forestales



El análisis multitemporal de imágenes satelitales en diferentes momentos permite supervisar el desarrollo de las comunidades de plantas y los cultivos agrícolas, especialmente en zonas vulnerables. Según Chen *et. al.* (2011) “los datos de teledetección multitemporal pueden proporcionar observaciones multitemporales antes, durante y después de un incendio forestal, y pueden mejorar la precisión de la detección de cambios”. Las técnicas de teledetección (RS) se convierten en una alternativa sin precedentes a las costosas y lentas medidas de campo en el monitoreo de los ecosistemas forestales en áreas geográficas grandes y remotas. Las imágenes satelitales multitemporales de amplia resolución espacial se han utilizado ampliamente en mediciones de áreas forestales antes y después de los incendios para mapear BA a escalas regionales y globales, y para estimar la severidad de los incendios y la recuperación de la vegetación (Kurbanov *et. al.*, 2022).

“El análisis multitemporal permite realizar procesos de planificación del territorio, entendiendo la evolución de las problemáticas y buscando a través de procesos planificados la solución de estas” (Flórez *et. al.*, 2017, pág. 7).

Las imágenes multiespectrales han demostrado ser una fuente valiosa para las evaluaciones de detección de cambios. Utilizando sensores con resoluciones espaciales y espectrales medias, como los de Landsat y Sentinel, se ha logrado estimar los cambios en la cobertura vegetal (Miranda, Acevedo y Guerrero, 2022).

1.3. Recuperación de cobertura vegetal después de incendios forestales

1.3.1. Patrones de cambio de la vegetación

La susceptibilidad de incendios en la vegetación está determinada principalmente por la cantidad, ubicación y grado de inflamabilidad de los materiales combustibles, lo que confiere a la vegetación un cierto grado de daño y capacidad para resistir y recuperarse del fuego (Jiménez , Urrego , y Toro, 2016). Según Buchadas *et. al.* (2023) “La cobertura del suelo se considera un factor crítico



para la propagación del fuego y tiene un alto peso a la hora de influir en el riesgo”. Es crucial analizar estos factores para desarrollar estrategias de prevención y mitigación efectivas. Los elementos clave que influyen en el "régimen de incendios" a lo largo de la historia son diversos: la densidad poblacional, las condiciones climáticas, la pérdida de bosques, la fragmentación de hábitats, la introducción de especies invasoras y el abandono de áreas rurales.

Según Shin et. al. (2022) muestran que el cambio de cobertura del suelo es mayormente generado por actividades humanas y afectan diversas propiedades de los ecosistemas, incluyendo las reservas y flujos de carbono, el albedo de la superficie terrestre y los balances energéticos. Estas modificaciones tienen un impacto significativo en el cambio climático global. Además, la fenología de las plantas juega un papel crucial en la provisión de servicios ecosistémicos, como festivales y oportunidades recreativas.

Los incendios desempeñan un papel relevante en los ecosistemas forestales, ya que ayudan a descomponer la materia orgánica, aportan nutrientes y pueden estimular el crecimiento de los árboles mediante la poda natural en incendios de baja intensidad (Pérez I. M., 2017). No obstante, los efectos negativos de los incendios varían según su intensidad, frecuencia y duración, pudiendo incluir la pérdida de animales y vegetación, degradación del suelo, erosión, contaminación del agua y riesgo de deslizamientos de tierras (Ulibarry, 2009).

El cambio climático ha transformado la dinámica de los incendios forestales, generando modificaciones en los ecosistemas. En distintas partes del mundo, se evidencian incendios de mayor dimensión, duración, fuerza y gravedad, causados por la acumulación extendida de materiales combustibles, temperaturas elevadas con niveles de humedad reducidos y sequías más prolongadas. Estos cambios subrayan la necesidad de desarrollar tecnologías y métodos avanzados para monitorear y manejar los incendios forestales de manera efectiva (Castillo, 2017).

1.3.2. Índices de incendios mediante imágenes satelitales



Los índices espectrales son utilizados para delimitar un área determinada que ha sufrido transformaciones en su cobertura por incendios. A continuación, se presenta un índice aplicado a incendios:

- **Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)**

El NDVI, derivado de la respuesta de la vegetación al espectro electromagnético, es ampliamente utilizado para identificar vegetación y analizar y monitorear las condiciones vegetativas y su dinámica en la cobertura del suelo (Olivares y López, 2019).

- **Índice Normalizado de Área Quemada (NBR)**

El índice Normalizado de Área Quemada (NBR) se utiliza para detectar áreas quemadas en incendios grandes, utilizando longitudes de onda de infrarrojo cercano (NIR) y de onda corta (SWIR), similar al NDVI, pero adaptado para este propósito específico (United Nations, 2021).

1.3.3. Patrones de recuperación de la vegetación

Investigaciones recientes destacan que las quemas agrícolas son una práctica continua y representan una de las principales causas de incendios forestales, afectando negativamente las dimensiones sociales, económicas y ambientales debido a la actividad humana y al calentamiento global (Tantavilca, 2022). Según Caccamo et al., (2014) indican que para analizar la recuperación de la vegetación se debe realizar series temporales (2000-2012) del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada, el Índice de Vegetación Mejorado y el Índice Infrarrojo de Diferencia Normalizada derivados del Espectro radiómetro de Imágenes de Resolución Moderada (MODIS). Los programas de recuperación de tierras para tierras cultivables se han acelerado rápidamente, con el objetivo de aumentar las áreas cultivadas y aliviar la presión sobre los suelos agrícolas fértiles. Por lo tanto, la detección y proyección de cambios en el uso de la tierra y el uso del suelo son esenciales para la gestión a largo plazo y la planificación del uso de los recursos naturales (Selmy et al., 2023).



1.4. Multi temporalidad de las ocurrencias de incendios forestales

1.4.1. Multi temporalidad de incendios forestales en Ecuador

Las estadísticas de incendios forestales en el cantón Santa Ana de 2012 a 2018, aunque incompletas, revelaron patrones temporales y espaciales sobre su ocurrencia y causas. Estos datos son cruciales para la gestión integral del fuego. Se identificó que la temporada de incendios ocurre de julio a enero, principalmente en las tardes, debido a la distribución de las precipitaciones y las condiciones diarias de temperatura y humedad. La mayoría de los incendios se registraron en la parroquia Ayacucho y en maleza (26,37%), vinculados al uso del fuego por agricultores para limpiar terrenos de manera rápida y económica (Ramos et. al., 2021).

La Reserva Ecológica "Mache-Chindul" (REMACH) es una de las 33 áreas naturales del Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SNAP) de Ecuador, administrada por el Ministerio del Ambiente (MAE). Esta reserva protege uno de los últimos bosques secos tropicales del país y diversas especies endémicas en peligro de extinción. Un estudio entre 2002 y 2012, utilizando SIG y ArcGIS Desktop 9.3 Er Mapper, analizó el cambio en la cobertura vegetal y la fragmentación del bosque.

Los datos, obtenidos del satélite Landsat 7 ETM (30 m/píxel) con una composición de pseudo color (RGB-431) y clasificación supervisada por el método de Distancia Mínima, mostraron que la reserva tiene 53,662 hectáreas de bosque natural (44.7% del área total) y 27,707 hectáreas de bosque en regeneración (23.1%). La fragmentación del bosque, especialmente al sur del cabo Rivet, afecta el 32.2% del área total, debido al aumento de la frontera agrícola y la extracción ilegal de madera. El índice poblacional en la zona ha disminuido de 5.71 a 5.39 ha/km² (Muñoz et al., 2016).

En Ecuador, en 2023 se perdieron unas 11,688.88 hectáreas de cobertura vegetal debido a 1,495 incendios registrados. Esta investigación tuvo como objetivo identificar áreas susceptibles a



incendios de cobertura vegetal (ICV) en el cantón Cotacachi y sus dos zonas diferenciadas. Se utilizaron métodos multicriterio, Proceso Analítico Jerárquico (AHP) y Radio Frecuencia (RF), en un entorno SIG. Se consideraron 11 factores: topográficos (altitud, pendiente, orientación), climáticos (precipitación, temperatura, evapotranspiración, déficit hídrico, velocidad del viento) y antrópicos (cobertura del suelo, proximidad a vías y zonas agrícolas).

Se obtuvieron modelos espaciales validados con la curva ROC y el área bajo la curva (AUC). El 47% del territorio está en riesgo extremo según AHP y el 53% según RF, especialmente en la zona subtropical. Los modelos AHP y RF mostraron AUC de 0.824 y 0.902, respectivamente, comparados con datos de FIRMS-NASA (2000-2020), y AUC de 0.748 y 0.755 para incendios históricos (2018-2020). Se concluye que ambos métodos presentaron resultados y desempeños similares (Arias et al., 2024).

1.4.2. Análisis de incendios forestales a través de SIG

El SIG se está utilizando para desarrollar un sistema de información y apoyo a la toma de decisiones para monitorear y predecir la actividad de incendios forestales, y para mejorar la eficiencia de la gestión de incendios. Los incendios pueden ser monitoreados y analizados en áreas extensas de una manera oportuna y rentable utilizando imágenes de sensores satelitales en combinación con el análisis espacial proporcionado por los Sistemas de Información Geográfica (SIG) (Sunar y Özkan, 2010).

Según Castro et al., (2022) “Los datos espectrales obtenidos de imágenes satelitales facilitan el cálculo de índices de vegetación, como el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI). Este índice se emplea para evaluar el verdor y la salud de la vegetación, así como para detectar cambios y analizar la fragmentación forestal”.

1.5. Investigaciones similares



1.5.1. Susceptibilidad para incendios de cubierta vegetal: una evaluación desde los métodos multicriterio y radiofrecuencia (Cantón Cotacachi, Ecuador)

En el cantón se realizó un modelo de Análisis Jerárquico (AHP) que muestra que alrededor del 51,41% del cantón presenta susceptibilidad alta y muy alta ante incendios de cobertura vegetal (ICV). Estas zonas propensas a incendios se concentran en el sector oriental y suroccidental del cantón, afectando principalmente las coberturas de bosque nativo (34,85%), páramo (7,22%) y cultivos (3,50%). La identificación de estas áreas críticas es esencial para la implementación de medidas preventivas y de gestión de riesgos. Cotacachi, que presenta dos zonas (andina y subtropical), también muestra variaciones en la susceptibilidad; la zona subtropical presenta más peligro extremo (susceptibilidad alta) en un 39,03% comparado con el 12,39% de la zona andina (Arias et al., 2024).

1.5.2. Análisis de zonas susceptibles a incendios de cobertura vegetal de la reserva ecológica “El Ángel”, provincia del Carchi

Angulo (2019) expone que, en el área de estudio, los rangos de susceptibilidad se determinaron en base al histórico de incendios registrados en la Reserva Ecológica El Ángel desde el año 2014 hasta junio del 2019, en los cuales el 82% de los incendios se presentaron en las orientaciones sureste, suroeste, sur y este, clasificadas con susceptibilidad alta y muy alta, ocupando el 58% del total del área de estudio. Este tipo de análisis histórico es crucial para la planificación y la reducción de riesgos futuros.

1.5.3. Determinación de la susceptibilidad a incendios de cobertura vegetal en la estación biológica Guandera

En la Estación Biológica Guandera, en la provincia del Carchi, la susceptibilidad de la cobertura vegetal se determinó que el páramo posee una susceptibilidad extrema a incendios, ocupando el 47% del área total de estudio. Las zonas con susceptibilidad muy alta y extrema a incendios se



encuentran en una extensión total de 447,85 hectáreas, representando un 45% del área de estudio. Estas áreas se identifican específicamente en zonas de transición entre bosque páramo y páramo, donde se ha presentado reincidencia de estos eventos según el historial de incendios registrados en la Estación Biológica Guandera (Cortez y Rivera, 2022). El monitoreo continuo y la identificación de áreas de alta susceptibilidad son esenciales para implementar estrategias efectivas de manejo de incendios.

1.5.4. Análisis multitemporal de áreas de cobertura vegetal incendiadas en el cantón Ibarra

En Imbabura, los incendios forestales son una causa principal de la pérdida de cobertura vegetal, por lo que es crucial estudiar su aumento reciente y proponer estrategias de control. Entre 2010 y 2020, se analizó el cambio de cobertura vegetal por incendios en el cantón Ibarra usando imágenes satelitales Landsat 7, Landsat 8, Sentinel-2, RapidEye y Planet Scope, aplicando los índices BAI y NDVI.

Antes de los incendios, las parroquias La Carolina, San Miguel de Ibarra y Angochagua tenían vegetación densa y vigorosa (23,171.80, 8645.55 y 11,530.49 ha, respectivamente), mientras que Ambuquí tenía vegetación dispersa (6635.37 ha). Después de los incendios, se recuperaron 3678.74 ha. Se propusieron tres estrategias: educación ambiental, reducción de materiales combustibles y aislamiento de amenazas. Se concluyó que la recuperación de la cobertura vegetal se facilitó por adaptaciones vegetativas y la inaccesibilidad de las áreas afectadas (Burbano y Rivera, 2022).

1.5.5. Zonificación de cobertura vegetal propensa a incendios en el cantón Cotacachi provincia de Imbabura

En los últimos años, los incendios forestales en Cotacachi han aumentado, causando daños irreversibles en los ecosistemas. Esta investigación identificó áreas susceptibles, perdiendo entre



15 y 300 hectáreas anualmente. Se analizaron factores topográficos, meteorológicos y sociales usando SIG, Análisis Jerárquico y Radiofrecuencia, destacando la radiofrecuencia por su calidad (Chi-cuadrado: 0.000002, ROC: 0.897).

Cotacachi presenta cinco niveles de susceptibilidad: muy baja (0.09%), baja (16.41%), moderada (33.86%), alta (33.67%) y extrema (15.97%), siendo el páramo andino la cobertura más propensa. Se implementaron estrategias de alerta temprana usando la metodología FODA para áreas vulnerables (Chuma y Coronado, 2022).

1.5.6. Análisis multitemporal de los cambios de la cobertura vegetal provocados por incendios forestales en San José de Minas, periodo 2012-2018

El uso tradicional del fuego para transformar bosques en tierras agrícolas ha dañado ecosistemas y alterado la cobertura vegetal. Esta investigación analizó el cambio de cobertura por incendios forestales en San José de Minas entre 2012 y 2018. Se utilizaron imágenes satelitales Landsat 7 y 8 del USGS, aplicando correcciones geométricas y radiométricas con ENVI 5.3. Se aplicó el índice NDVI para evaluar el estado de la vegetación y su regeneración, y el índice NBR para identificar áreas afectadas.

Entre 2012 y 2018 se registraron 407 incendios que afectaron 1468.70 ha, siendo los bosques nativos los más dañados en 2012 con 171.93 ha, y recuperándose en 2018 en 92.23 ha. El uso de imágenes satelitales y índices espectrales permitió identificar y monitorear la recuperación de la cobertura vegetal tras los incendios (Mejía, 2021).



CAPÍTULO II

MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Tipo de investigación según los siguientes criterios:

La investigación tiene un enfoque de tipo cuantitativo, donde se recopilaron y analizaron datos numéricos para medir y cuantificar variables como: cálculo del índice de vegetación, cálculo del índice de incendios (NDVI y NBR) y análisis multitemporal de los cambios de cobertura vegetal. Además, pertenece al tipo de investigación aplicada, ya que el objetivo fue proporcionar soluciones prácticas y accionables para la gestión del riesgo de incendios con un alcance descriptivo para delimitar e identificar las zonas con diferentes grados de susceptibilidad a incendios. Se realizó un diseño no experimental, por ende, no existió manipulación de los factores o variables de estudio. Se analizó un tiempo asincrónico a lo largo del periodo 2013 al 2023

2.2. Ubicación del lugar

El área Protegida Taita Imbabura se encuentra ubicada de la siguiente manera:

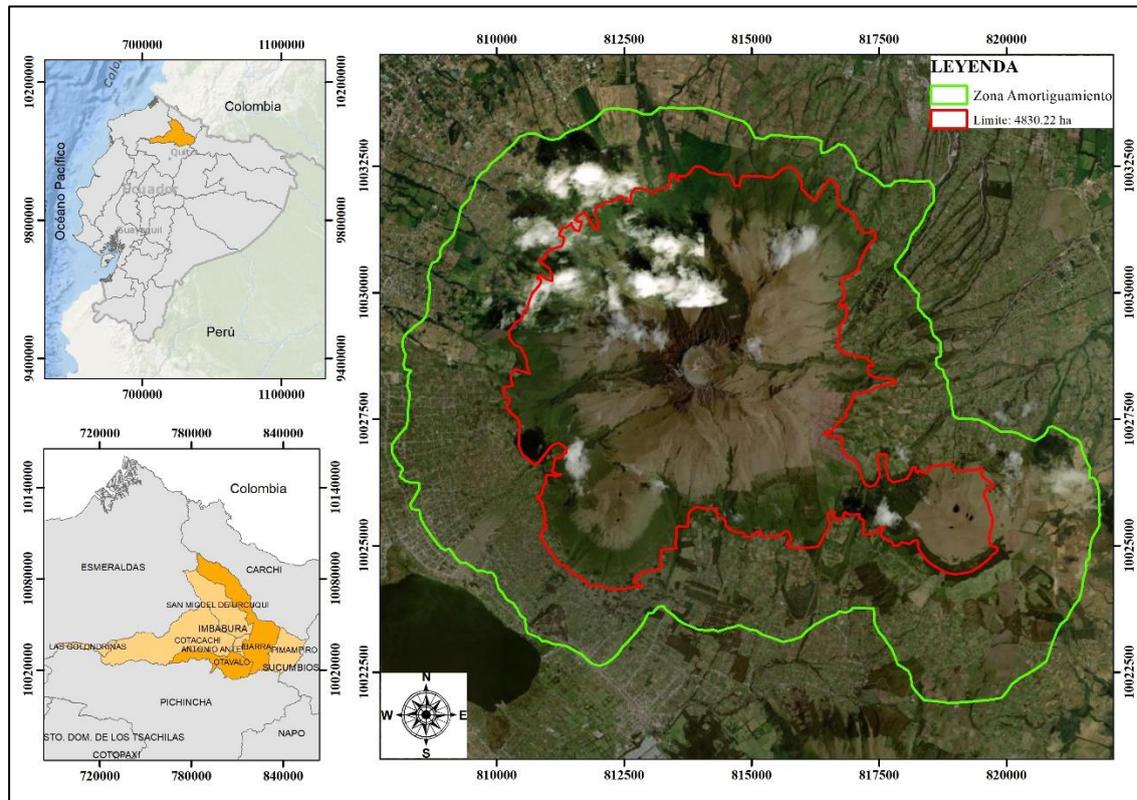
- Política: Parroquia El Sagrario, Cantón Ibarra, Provincia de Imbabura

En la Tabla 1 se indica las coordenadas de los puntos extremos del área de estudio.

Tabla 1. *Coordenadas del área de estudio (WGS84 UTM 17S)*

Norte	Sur
X: 814200	X: 818700
Y: 10033800	Y: 10000800
Este	Oeste
X: 816600	X: 808300
Y: 10026300	Y: 10028700

Figura 1. Ubicación del Área Protegida "Taita Imbabura"



- Límites

Norte: Ciudad de Ibarra y San Antonio del cantón Ibarra; San Francisco de Natabuela, Atuntaqui y San Roque del cantón Antonio Ante

Sur: Parroquia San Pablo del cantón Otavalo

Este: Ciudad de Ibarra y parroquia La Esperanza del cantón Ibarra

Oeste: Parroquia San Juan de Ilumán, Peguche y Eugenio Espejo del cantón Otavalo

2.3. Caracterización edafoclimática del lugar

Según el Sistema Nacional de Información (SNI, 2017) las características biofísicas del área de estudio son las siguientes

- Orden del Suelo:



Inceptisol que se caracteriza por ser suelos poco desarrollados, con acumulación de materia orgánica en climas fríos debido a la lenta descomposición. Tienen pH ácido, mal drenaje y pueden contener alófana (Ibáñez et al., 2011).

Molisol que se caracteriza por ser suelos oscuros, ricos en materia orgánica y muy fértiles. Se hallan en valles cálidos con alto contenido de arcillas y cationes, pero son propensos a compactarse por la mecanización (Ibáñez et al., 2011).

- Clima: Ecuatorial Frío de Alta Montaña
- Temperatura media anual: 4-10 °C
- Precipitación media anual: 600-700 mm

2.4. Materiales, equipos y software

Tabla 2. *Materiales, equipos y software a emplear en la investigación.*

Materiales de campo	Materiales de laboratorio	Equipos	Software
Papel Bond	USB	Cámara fotográfica	Cartografía base formato Ráster y Shapefile
Esfero	Internet	Navegador GPS	Cartografía temática formato Ráster y Shapefile
Tablero de mano	Registro de incendios		ArcGIS Pro

2.5. Métodos, técnicas e instrumentos

2.5.1. Universo-población:

El área de estudio tiene 10951.58 ha y corresponde a la superficie del área protegida Taita Imbabura, incluyendo la zona de amortiguamiento.



2.5.2. Tamaño de la muestra:

Una vez determinada el área de incendios se procedió a calcular el tamaño de muestra con base a la siguiente ecuación:

$$n = \frac{Z\alpha^2 * p * q}{e^2}$$

Donde:

n: muestra

p: Probabilidad a favor

q: Probabilidad en contra

z: Nivel de confianza

e: Error de muestra

2.5.3. Muestreo:

A través del software ArcGIS Pro se identificaron los sitios con recurrencias de incendios históricos desde el año 2013 hasta 2023, mediante la información georreferenciada de la Secretaría de Gestión de Riesgos (SGR, 2024).

2.5.4. Trabajo a desarrollar en gabinete y campo

En el laboratorio de Geomática de la Universidad Técnica del Norte, se elaboró el análisis de las variables cobertura vegetal, pendiente del terreno y uso de suelo que fueron obtenidas del Sistema Nacional de Información y clasificaciones supervisadas de imágenes, complementando con puntos GPS del área de estudio. El trabajo en campo se basó en el reconocimiento del área y la verificación de datos que coincidan con las mismas que fueron obtenidas de la aplicación Earth Explorer.

2.6. Variables de estudio

Determinación de áreas susceptibles a incendios forestales en el área protegida Taita Imbabura.



Para determinar las áreas susceptibles a incendios forestales se empleó las siguientes variables de estudio que corresponden a variables del suelo y variables climáticas.

- Cobertura vegetal
- Pendiente
- Uso de suelo
- Velocidad del viento
- Altitud del terreno
- Orientación del terreno

Se realizó una clasificación de cinco clases de cada variable para identificar la susceptibilidad a incendios como se indica en la Tabla 3.

Tabla 3. *Clasificación de susceptibilidad*

Clase	Susceptibilidad	Color
0	No aplica	Gris
1	Muy baja	Verde
2	Baja	Verde azul
3	Moderada	Amarilla
4	Alta	Naranja
5	Muy alta	Roja

Variables Topográficos

Las clases para la susceptibilidad en relación con la cobertura vegetal se indica en la Tabla 4.

Tabla 4. *Susceptibilidad cobertura vegetal*

Clase	Categorías	Susceptibilidad	Color
0	Afloramiento de roca	No aplica	Gris
1	Mosaico agrícola	Muy baja	Verde
2	Mosaico pecuario	Baja	Verde azul
3	Bosque Nativo	Moderada	Amarilla
4	Plantaciones Forestales	Alta	Naranja
5	Páramo	Muy alta	Roja



Las clases para la susceptibilidad con base al uso del suelo se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Susceptibilidad uso del suelo

Clase	Categorías	Susceptibilidad	Color
0	Afloramiento de roca	No aplica	Gris
1	Cultivos	Muy baja	Verde
2	Pastos	Baja	Verde azul
3	Bosque Nativo	Moderada	Amarilla
4	Plantaciones Forestales	Alta	Naranja
5	Páramo	Muy alta	Roja

Las clases para la susceptibilidad de acuerdo con la altitud del terreno se presenta en la Tabla 6.

Tabla 6. Susceptibilidad altitud del terreno

Clase	Categorías (msnm)	Susceptibilidad	Color
1	< 3000	Muy baja	Verde
2	3000 - 3250	Baja	Verde azul
3	3250 - 3500	Moderada	Amarilla
4	3500 - 4000	Alta	Naranja
0	> 4000	Muy alta	Roja

Las clases para la susceptibilidad en función a la orientación del terreno se presenta en la Tabla 7.

Tabla 7. Susceptibilidad orientación del terreno

Clase	Categorías	Susceptibilidad	Color
1	Plano	Muy baja	Verde
2	Este	Baja	Verde azul
3	Sur	Moderada	Amarilla
4	Oeste	Alta	Naranja
5	Norte	Muy alta	Roja

Las clases para la susceptibilidad en referencia a la pendiente del terreno se muestra en la Tabla 8.

Tabla 8. Susceptibilidad pendiente

Clase	Categorías	Categorías	Susceptibilidad	Color
1	0 - 12	Ligeramente ondulado- Muy montañoso	Muy baja	Verde



2	12 - 25	Montañoso	Baja	Verde azul
3	25 - 50	Muy montañoso	Moderada	Amarilla
4	50 - 70	Escarpado	Alta	Naranja
5	> 70	Muy Escarpado	Muy alta	Roja

Las clases para la susceptibilidad relación a la velocidad del viento del terreno se indica en la Tabla 9.

Tabla 9. Susceptibilidad velocidad del viento

Clase	Categorías (m/s)	Susceptibilidad	Color
1	0 - 1	Muy baja	Verde
2	1 - 2	Baja	Verde azul
3	2 - 4	Moderada	Amarilla
4	4 - 6	Alta	Naranja
5	> 6	Muy alta	Roja

Análisis multitemporal de las ocurrencias de incendios en las áreas susceptibles.

Se calcularon índices espectrales obtenidos en imágenes y se analizó la variación multitemporal de las áreas susceptibles.

- Índice de vegetación (NDVI)
- Índice de incendios (NBR)
- Variación multitemporal de las áreas susceptibles (2013-2023)

Cada variable en estudio se empleó en el análisis de la susceptibilidad mediante la siguiente ecuación:

2.6.1. Ecuación de suma ponderada

$$\text{Susceptibilidad} = (\text{Cob.veg} * 0.25) + (\text{Pend} * 0.20) + (\text{U. Sue} * 0.10) + (\text{V. Vien} * 0.15) + (\text{Al. Terr} * 0.15) + (\text{Or. Terr} * 0.15)$$

Donde:



Cob. veg = ráster reclasificado de cobertura vegetal (25 %)

Pend = ráster reclasificado de Pendientes (20 %)

U. Sue = ráster reclasificado de Uso del suelo (10 %)

V. vient= ráster reclasificado de Velocidad del Viento (15 %)

Al. Terr= ráster reclasificado de Temperatura (15 %)

Or. Terr = ráster reclasificado de Orientación del Terreno (15 %)

2.6.2. Para el cálculo del índice de vegetación se aplicó la siguiente fórmula:

Expuesta por (Olivares & López, 2019):

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

NDVI: Índice de vegetación de diferencia normalizada en imágenes Landsat

NIR: Infrarrojo cercano

RED: Rojo

2.6.3. Para el cálculo de índice de incendios se aplicó la siguiente fórmula:

Expuesta por (United Nations, 2021):

$$NBR = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}$$

NBR: Índice de incendios en imágenes Landsat

NIR: Infrarrojo cercano

SWIR: Infrarrojo medio

El cálculo y registro del análisis multitemporal de cobertura vegetal se realizó mediante la siguiente matriz.

2.7. Procedimiento y análisis de datos.

2.7.1. Determinación de las áreas susceptibles a incendios forestales en el área protegida Taita Imbabura.



Paso 1: Obtención de Datos

Imágenes Satelitales: Se descargó imágenes de los satélites para los años 2013 a 2023, desde los geoportales del USGS de la NASA (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) de los años 2013, 2015, 2017, 2019, 2020 y 2023 y del Ministerio de Ambiente, Agua y Transición Ecológica <http://ide.ambiente.gob.ec/mapainteractivo/> de los años 2014, 2016, 2018 y 2022. Las imágenes del Satélite Landsat 8 correspondieron a los sensores ETM (Enhanced Thematic Mapper) y OLI (Operational Land Imager) con Path/Row 10/60.

Tabla 10. Listado de imágenes Landsat 8 y archivos de uso de suelo y cobertura vegetal

IMAGEN/FUENTE	AÑO	NOMBRE
Landsat 8	2013	LC08_L2SP_010060_20130925.tif
MAATE	2014	Uso del suelo y cobertura vegetal del año 2014
Landsat 8	2015	LC08_L2SP_010060_20150915.tif
Landsat 8	2016	Uso del suelo y cobertura vegetal del año 2016
Landsat 8	2017	LC08_L2SP_010060_20170123.tif
Landsat 8	2017	LC08_L2SP_010060_20170920.tif
Landsat 8	2018	Uso del suelo y cobertura vegetal del año 2018
Landsat 8	2019	LC08_L2SP_010060_20190825.tif
Landsat 8	2020	LC08_L2SP_010060_20200811.tif
Ninguno	2021	No existe información sobre cobertura de imágenes libres de nubes, tampoco se dispone de información procesada del MAATE.



Landsat 8	2022	Uso del suelo y cobertura vegetal del año 2022
Landsat 8	2023	LC08_L2SP_010060_20230719.tif

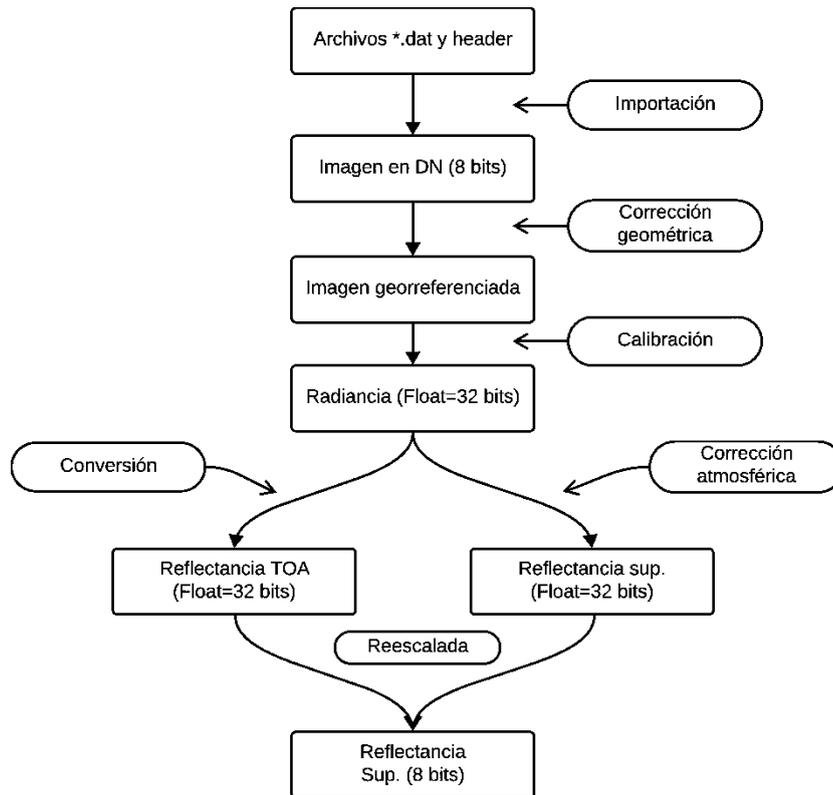
Datos Geoespaciales: Se generó datos de cobertura vegetal, pendiente, uso de suelo, velocidad del viento, altitud del terreno y orientación del terreno con base en la información descargada desde los geoportales del IGM (<https://www.geoportaligm.gob.ec/portal/>), INAMHI (<https://www.inamhi.gob.ec/>) y MAG (<https://www.agricultura.gob.ec/>).

Registros Históricos de Incendios: Se obtuvo registros de incendios de la Secretaría de Gestión de Riesgos (<https://www.gestionderiesgos.gob.ec/>).

Paso 2: Preprocesamiento de Datos

Corrección de Imágenes: Se realizó las correcciones radiométricas y geométricas de las imágenes Landsat para reducir el ruido y mejorar la calidad de las imágenes. En la Figura 2 se indica el procedimiento para el procesamiento y corrección de las imágenes Landsat.

Figura 2. *Proceso para la corrección de imágenes Landsat*

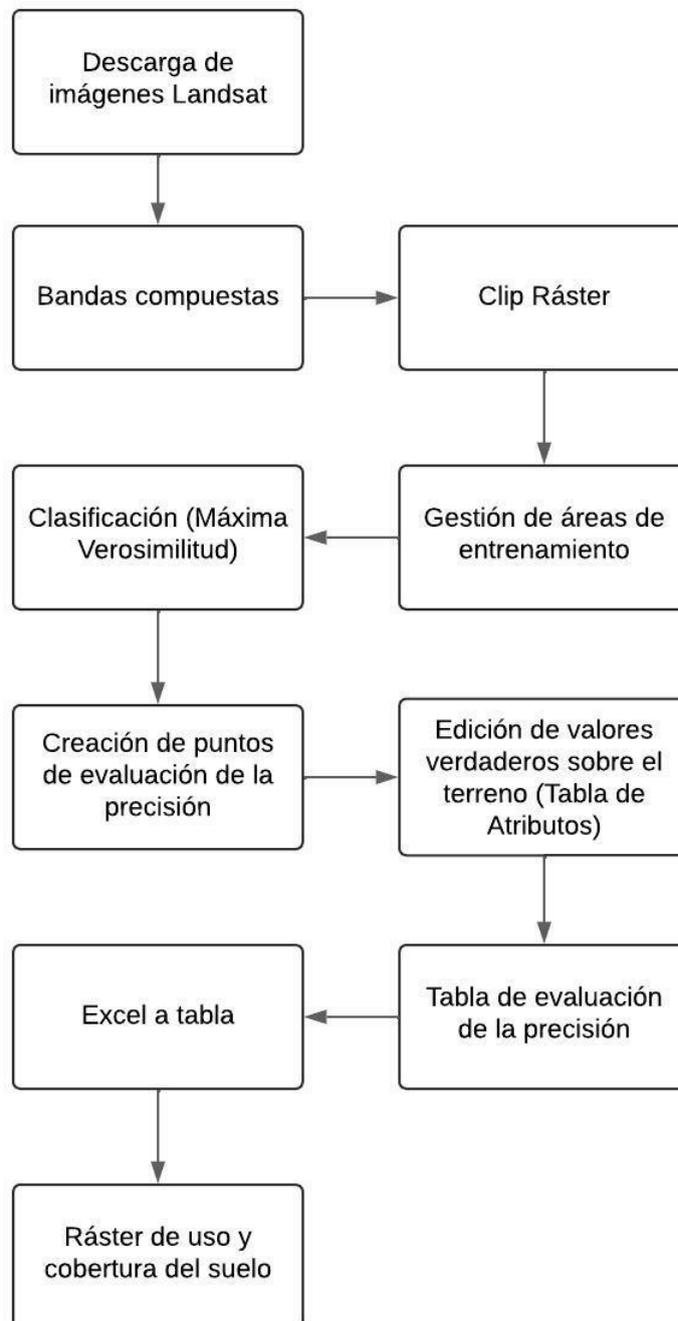


Fuente: La autora

Paso 3: Identificación de Áreas Susceptibles

Clasificación Supervisada: Las imágenes corregidas se clasificaron mediante el método de máxima verosimilitud para identificar y cuantificar las áreas susceptibles, usando técnicas de clasificación en software ArcGIS Pro. En la Figura 3 se indica el proceso de la clasificación supervisada de las imágenes Landsat.

Figura 3. *Procesos para la clasificación supervisada*



Fuente: La autora

Análisis Jerárquico de Procesos (AHP): Se aplicó el análisis multicriterio desarrollado por Thomas L. Saaty (Analytic Hierarchy Process) para determinar la susceptibilidad, la cual consiste en la ordenación de prioridades que indica la preferencia general para cada una de las opciones de



decisión. En la Tabla 11 se indica el peso asignado a las variables de acuerdo con la jerarquía de influencia de cada variable en la susceptibilidad a incendios forestales (Nantes, 2019).

Tabla 11. *Pesos asignados a las variables*

Variables	Peso
Cobertura vegetal	0.25
Pendientes	0.20
Uso del suelo	0.10
Velocidad del Viento	0.15
Altitud del Terreno	0.15
Orientación del Terreno	0.15
Total	1

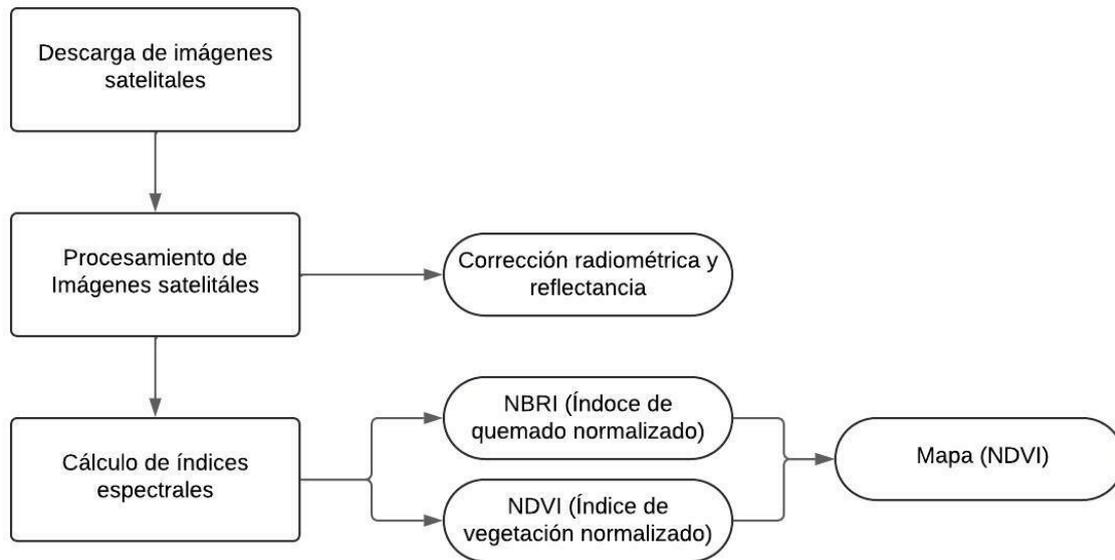
Paso 4: Análisis de Índices de Vegetación e Incendios

Cálculo de NDVI:

Evaluación de la salud de la vegetación: en el ráster de NDVI los valores negativos indican ausencia de vegetación (agua, ríos, lagunas, desiertos, rocas, ciudades, nubes, sombras de nubes) y los valores positivos indican presencia de vegetación (cultivos, pastos, bosque seco, bosque húmedo, bosque plantado). Con las funciones de la calculadora Ráster se calculó el NDVI y se realizó una clasificación supervisada en 5 categorías para determinar presencia de nubes y agua (NA), suelo sin vegetación (SV), vegetación ligera (VL), vegetación mediana (VM) y vegetación alta (VA).

Finalmente se calculó la superficie en hectáreas en cada una de las categorías. Además, se analizó con los patrones de comparación con una escala de -1 a 1 para la respectiva interpretación, donde los valores de -1 hasta 0 son plantas incendiadas, de 0 hasta 0.33 plantas enfermas, de 0.33 hasta 0.66 plantas moderadamente sanas y de 0.66 hasta 1 plantas muy sanas. En la Figura 4 se indica el procedimiento para el cálculo de Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada.

Figura 4. *Proceso para el cálculo del NDVI*



Fuente: La autora

Cálculo de NBR:

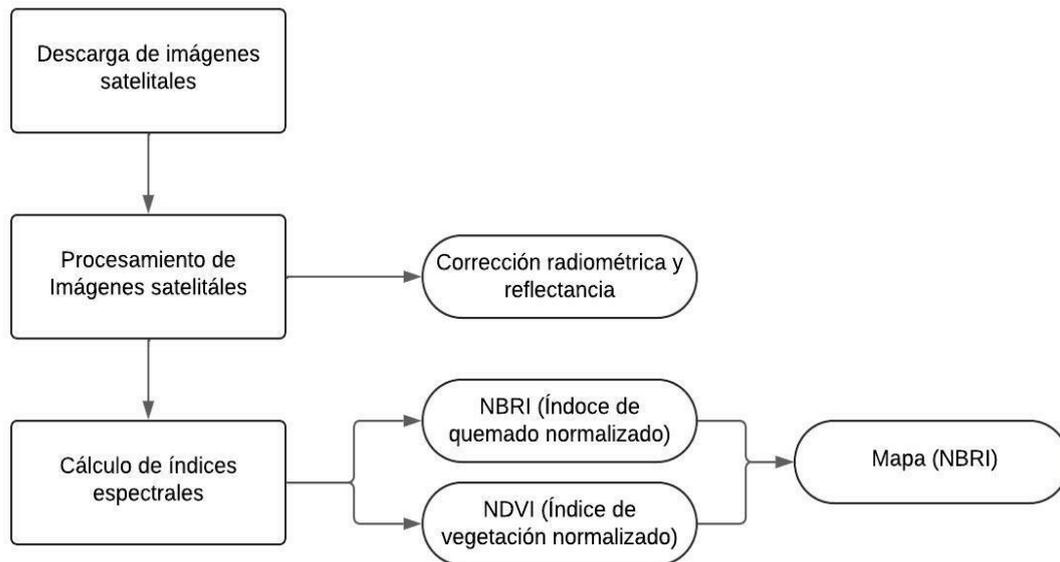
Identificación y cuantificación de áreas quemadas: para cuantificar las áreas quemadas se empleó el Índice de Incendios (NBR), mediante la herramienta "Raster Calculator", con las bandas NIR (Near infrared) que representa el valor de la banda en el espectro infrarrojo cercano y SWIR (Middle infrared) que representa el valor de la banda en el espectro infrarrojo medio.

La identificación de áreas quemadas se obtuvo en función de los valores obtenidos, donde los valores más altos de NBR indican áreas quemadas, mientras que los valores bajos o negativos indican vegetación sana.

Además, se utilizó la herramienta "Reclassify" para definir rangos de valores y asignarles clases como "quemado" y "no quemado". Se realizó un análisis de comparación mostrando una escala de

incendios donde, 5 es extremo, 4 muy alto, 3 alto, 2 moderado y 1 bajo. En la Figura 5 se indica el procedimiento para el cálculo de Índice Normalizado de Áreas Quemadas.

Figura 5. *Proceso para el cálculo del NBR*



Fuente: La autora

2.7.2. Evaluación de los patrones de cambio y recuperación de la vegetación en las áreas afectadas por incendios forestales en las áreas identificadas como susceptibles.

Paso 1: Análisis Multitemporal

Análisis Espacial y Temporal: se analizaron las imágenes satelitales de diferentes años para detectar cambios en la cobertura vegetal. Además, se evaluaron la distribución espacial y temporal de los incendios forestales mediante técnicas de teledetección.

Paso 2: Evaluación de la Recuperación Vegetal

Análisis de Recuperación: Se comparó los índices de vegetación (NDVI) antes y después de la ocurrencia de incendios para evaluar la recuperación de la cobertura vegetal.

Identificación de Patrones: se identificó patrones de recuperación de la vegetación y de las áreas que presentan diferentes tasas de regeneración.



Paso 3: Validación de Resultados

Trabajo de Campo: se realizó visitas de campo para validar los resultados obtenidos en el análisis y procesamiento de imágenes de satélite. En las visitas de campo se usó dispositivos GPS para verificar la precisión de los mapas generados con la matriz de confusión como se muestra en la Tabla 12.

Tabla 12. *Matriz de confusión*

		Predicción	
		Positivos	Negativos
Observación	Positivos	Verdaderos positivos (VP)	Falsos Negativos (FN)
	Negativos	Falsos Positivos (FP)	Verdaderos Negativos (VN)

Cálculos estadísticos como:

Curva ROC: se generó una capa de puntos en ArcGIS Pro con Create Feature Class, asignando 1 a áreas incendiadas y 0 a no incendiadas, se usó Extract Multi Values to Points para obtener valores de susceptibilidad de los rásteres. Con estos datos, se aplicó un código en el software R para ordenar los valores, calcular la tasa de verdaderos positivos (TPR) y falsos positivos (FPR) en diferentes umbrales, y construir la curva ROC para medir la precisión del modelo y se analizó el umbral óptimo para mejorar la predicción de incendios.



CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Categorización de variables topográficas, antrópicas y climáticas que influyen en la susceptibilidad de incendios forestales

Las variables topográficas, climáticas y antrópicas que tuvieron influencia en la susceptibilidad de incendios forestales fueron: pendiente, altitud, orientación del terreno, velocidad del viento, uso del suelo y cobertura vegetal. Las variables biofísicas que incidieron en la ocurrencia de incendios en el área protegida Taita Imbabura y zona de amortiguamiento tienen un orden con peso porcentual como se muestra en la Tabla 13.

Tabla 13. Variables que influyen en la susceptibilidad de incendios

Variables	Peso (%)
Cobertura vegetal	25 %
Pendiente	20 %
Altitud	15 %
Orientación del terreno	15 %
Velocidad del viento	15 %
Uso del suelo	10 %

Adaptado de (Angulo Valencia, 2019)

El fuego que avanza de manera descontrolada sobre la cobertura vegetal, sin que su quema haya sido planificada (Escobar, 2021), constituye uno de los riesgos más frecuentes en los entornos naturales durante las últimas décadas, es decir es el más importante porque determina la cantidad, tipo y distribución del combustible disponible. Según Arias Muñoz D., Chuma Pomasqui, Coronado Cacuango, y Jácome Aguirre (2024) el bosque forma parte de un conjunto heterogéneo de coberturas vegetales y no representa ninguna barrera que impida la propagación del fuego hacia otras coberturas. En cuanto a las pendientes mientras más pronunciadas sean tienen más vegetación



densa y el riesgo es significativamente mayor. “El aumento en el grado de ésta intensifica la susceptibilidad al fuego, ya que la inclinación facilita el ascenso del aire caliente, creando un efecto de precalentamiento en la vegetación situada arriba de las laderas” (Arias, Chuma, Coronado y Jácome, 2024)

La altitud influye en las condiciones climáticas y la composición de la vegetación ya que define los tipos de cobertura vegetal. Loor, (2022) indica que la altitud es una variable que reduce el riesgo de que se produzca un incendio, ya que cuanto mayor es la altitud, menor es la temperatura, menos vegetación inflamable (como páramos), pero el viento puede intensificar eventos y a menor altitud, más oxígeno, temperaturas más altas y vegetación densa, lo que favorece los incendios. La orientación del terreno afecta la ocurrencia de incendios en la cobertura vegetal debido a la intensidad de la radiación solar que incide sobre la superficie.

Esto está relacionado con la cantidad de radiación que reciben los combustibles, lo cual influye en su nivel de humedad y en la humedad ambiental circundante (Vilchis, 2015). La ocurrencia de incendios está vinculada al viento, ya que este elemento climático impacta directamente la vegetación al reducir de manera considerable su contenido de humedad. Esto causa la deshidratación de la vegetación, que actúa como combustible, favoreciendo tanto la propagación como la intensificación de los incendios (Angulo Valencia, 2019). Por último el uso del suelo refleja cómo el ser humano influye en la susceptibilidad que actúa como un modulador que puede incrementar o disminuir la vulnerabilidad inherente del área. Zhai, Ning, Dahal, y Yang, (2023) indica los tipos de uso del suelo afectan los regímenes de incendios forestales, especialmente en aspectos como el tamaño, la frecuencia y la intensidad de los incendios, debido a las variaciones en la acumulación de combustible y la estructura de la vegetación.

3.2. Ponderación de las variables topográficas, antrópicas y climáticas que inciden en la susceptibilidad de incendios forestales

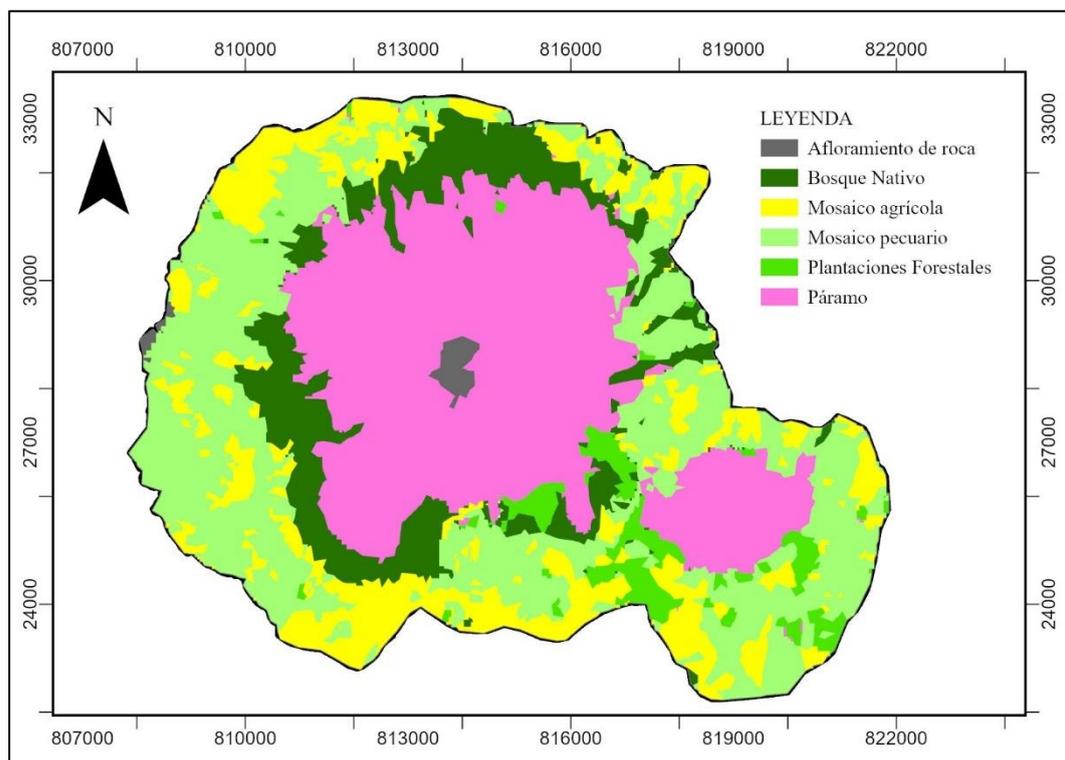
3.2.1. Factores antrópicos

En este estudio, el análisis se centró en el período de 2013 a 2023. Sin embargo, no se fue posible obtener imágenes satelitales de 2013 y 2021 debido a la alta nubosidad en esas fechas, y el geoportal del MAATE tampoco proporcionó información para esos años. Por lo tanto, el análisis se realizó con los datos disponibles para los años en los que se dispone de información.

Cobertura vegetal

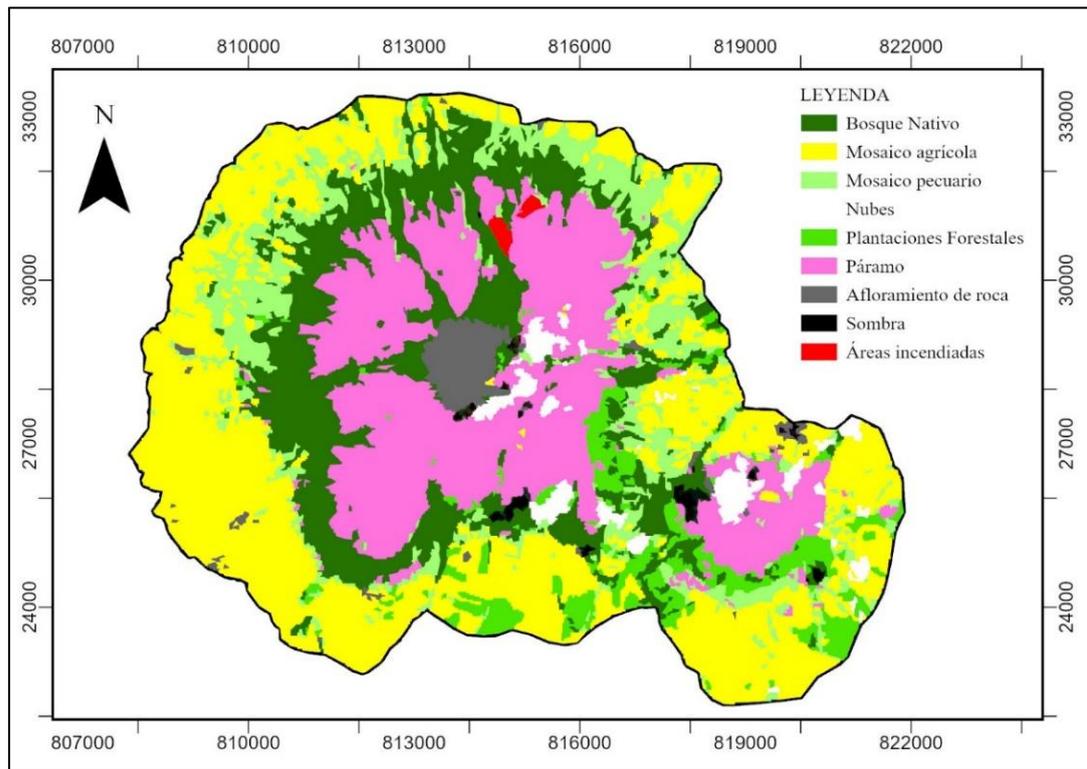
Las categorías de cobertura del suelo con mayor superficie en el área protegida Taita Imbabura en el año 2014 fueron: Páramo y Bosque Nativo, las mismas que cubren el 48.01% de la superficie total, como se indica en la Figura 6.

Figura 6. Cobertura vegetal 2014



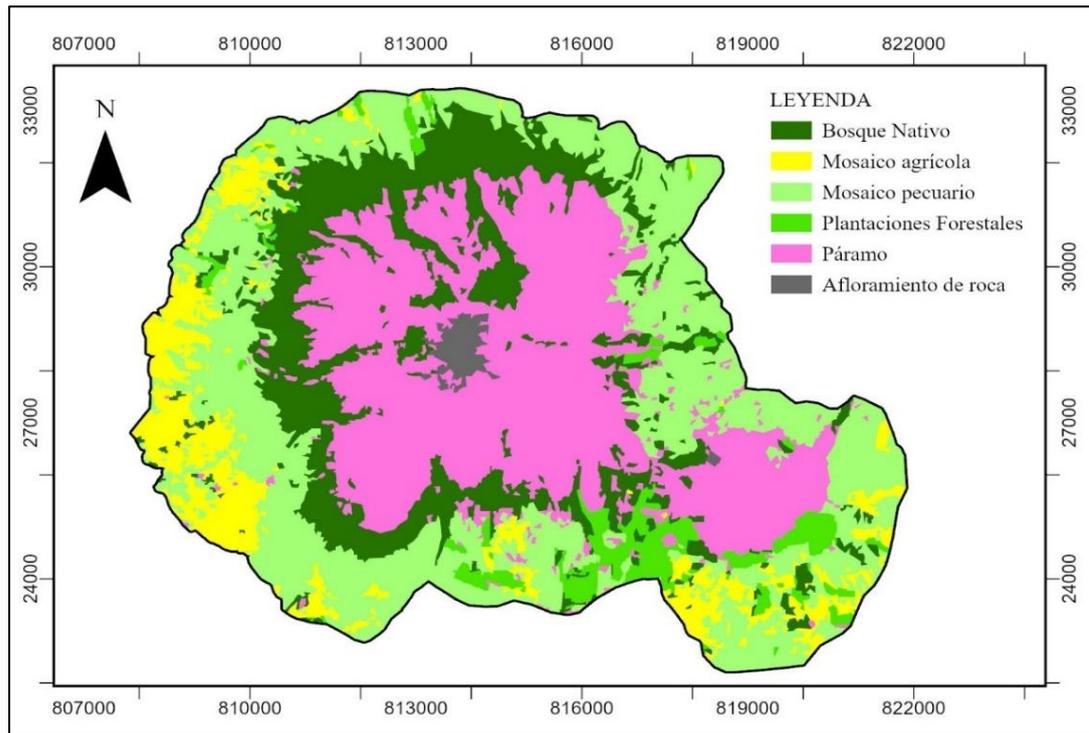
Las categorías de cobertura del suelo que tuvieron mayor superficie en el área protegida Taita Imbabura en el año 2015 fueron: Páramo y Bosque nativo las mismas que cubren el 42.74 % de la superficie total, como se muestra en la Figura 7.

Figura 7. Cobertura vegetal 2015



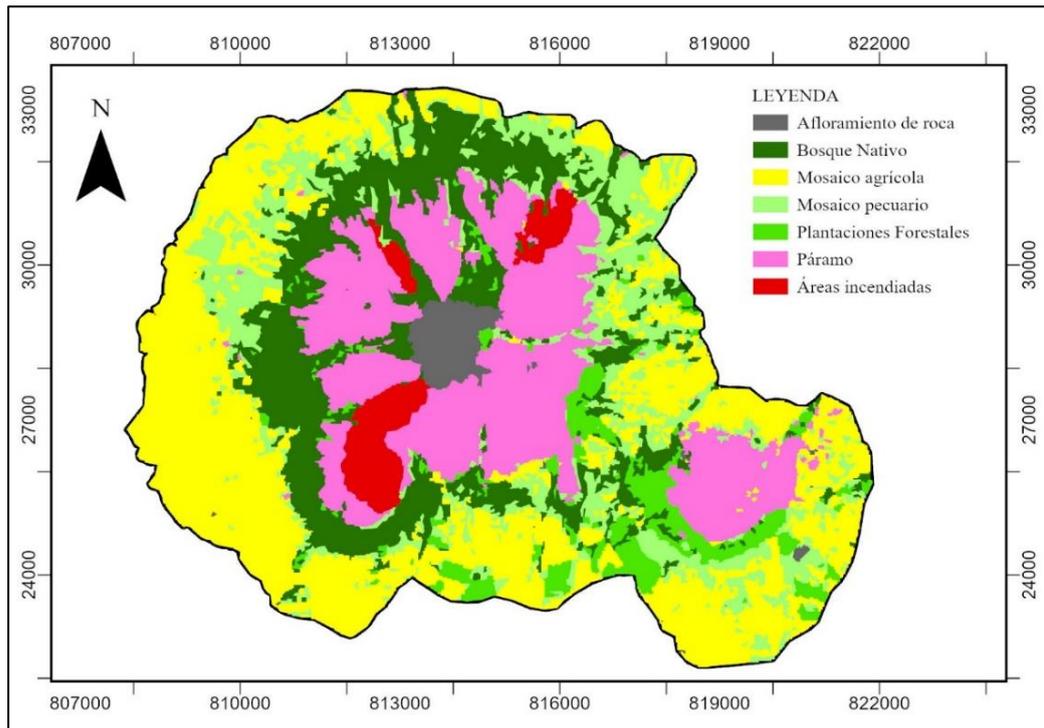
Las categorías de cobertura del suelo que tuvieron mayor superficie en el área protegida Taita Imbabura en el año 2016 fueron: Páramo y Bosque nativo las mismas que cubren el 52.65 % de la superficie total, como se evidencia en la Figura 8.

Figura 8. Cobertura vegetal 2016



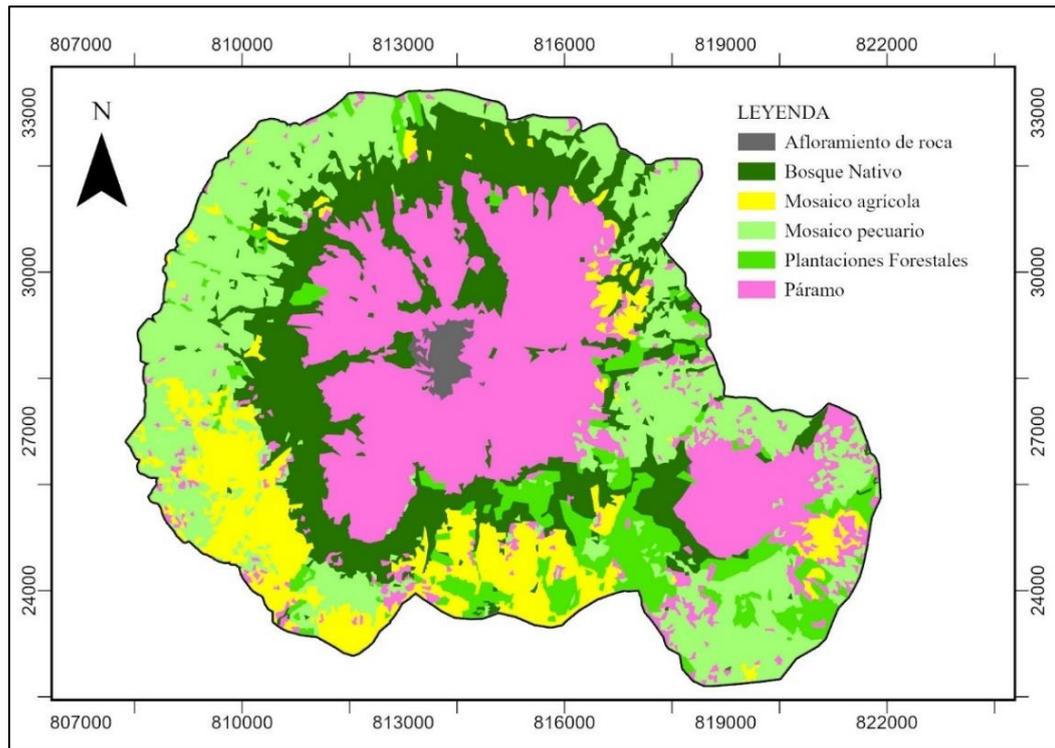
Las categorías de cobertura del suelo con mayor superficie en el área protegida Taita Imbabura en el año 2017 fueron: Páramo y Bosque nativo las mismas que cubren el 39.88 % de la superficie total, como se indica en la Figura 9.

Figura 9. Cobertura vegetal 2017



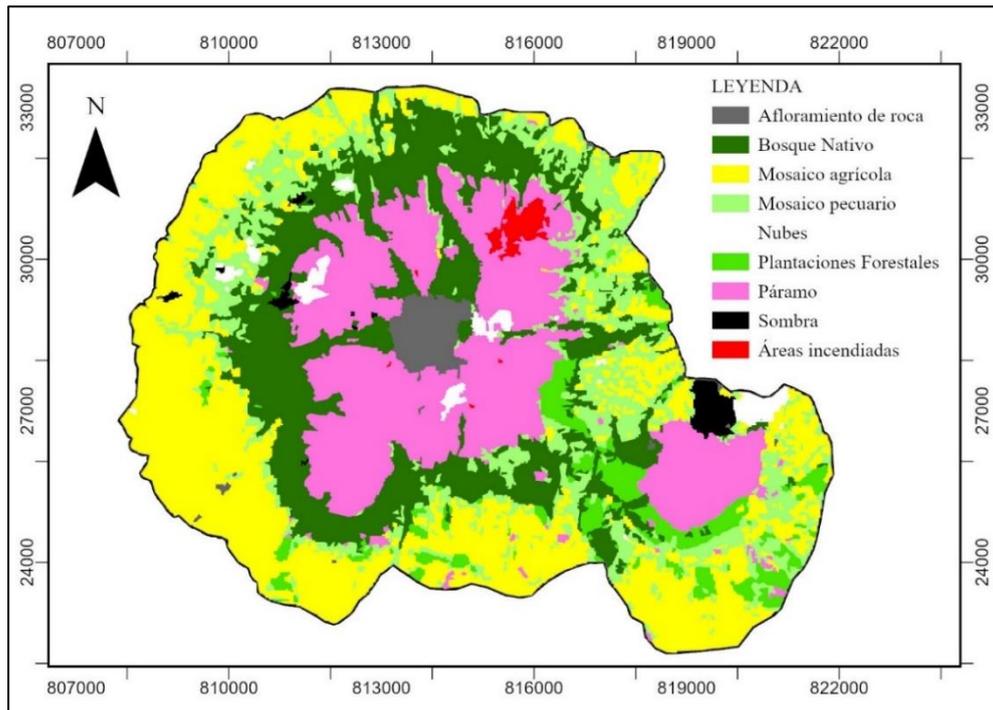
Las categorías de cobertura del suelo con mayor superficie en el área protegida Taita Imbabura en el año 2018 fueron: Páramo y Bosque nativo las mismas que cubren el 53.06 % de la superficie total, como se evidencia en la Figura 10.

Figura 10. Cobertura vegetal 2018



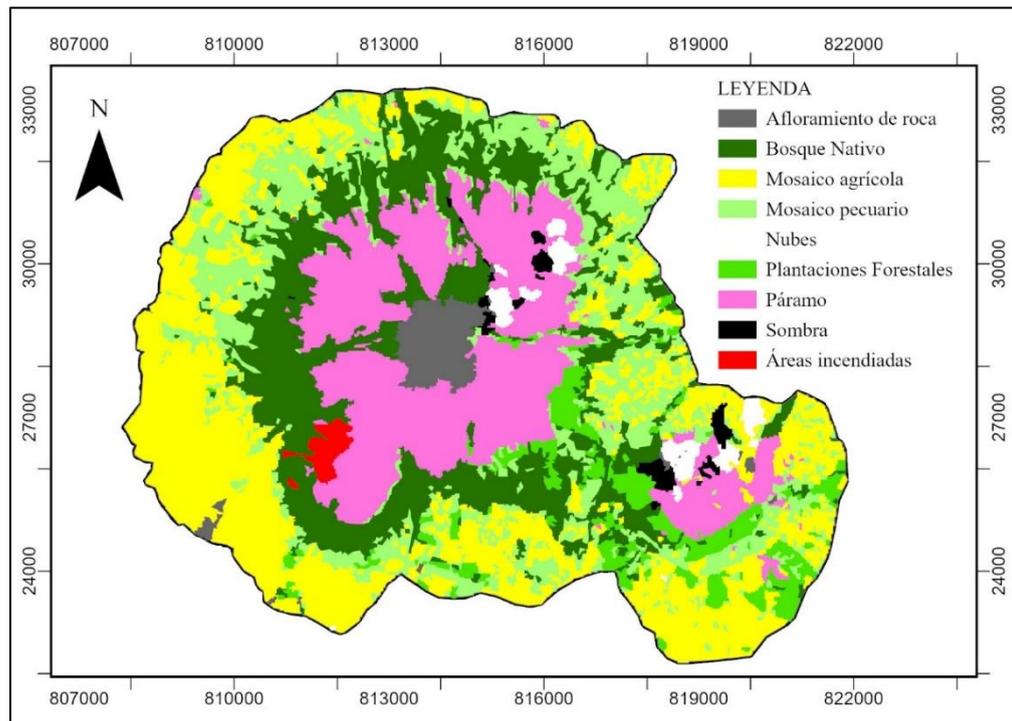
Las categorías de cobertura del suelo que tuvieron mayor superficie en el área protegida Taita Imbabura en el año 2019 fueron: Páramo y Bosque nativo las mismas que cubren el 44.73 % de la superficie total, como se expone en la Figura 11.

Figura 11. Cobertura vegetal 2019



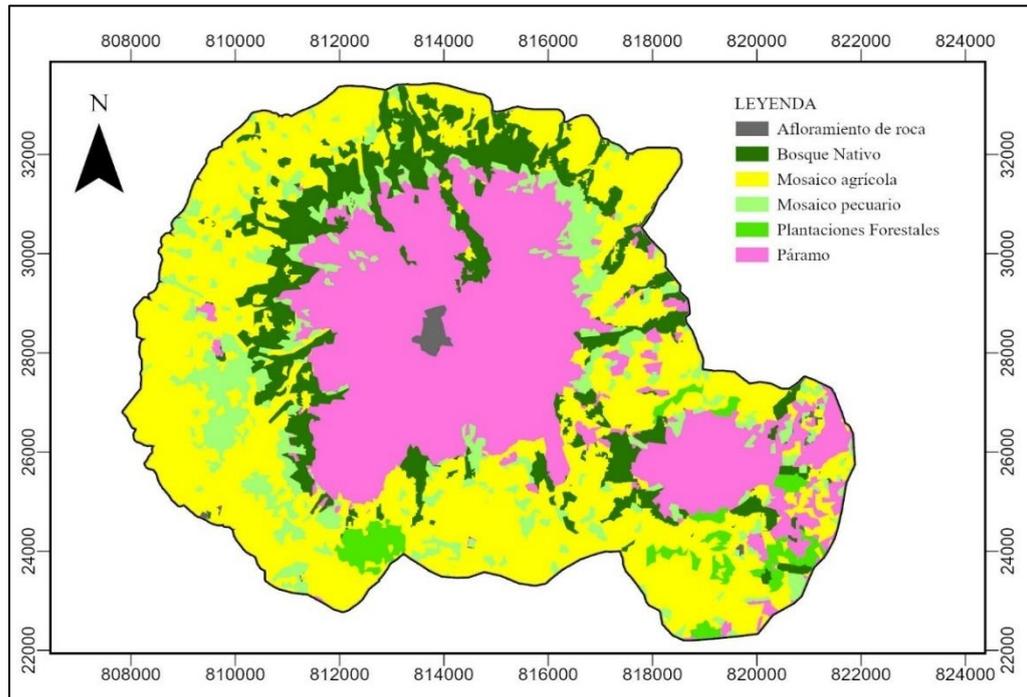
Las categorías de cobertura del suelo con mayor superficie en el área protegida Taita Imbabura en el año 2020 fueron: Páramo y Bosque nativo las mismas que cubren el 41.64 % de la superficie total, como se indica en la Figura 12.

Figura 12. Cobertura vegetal 2020



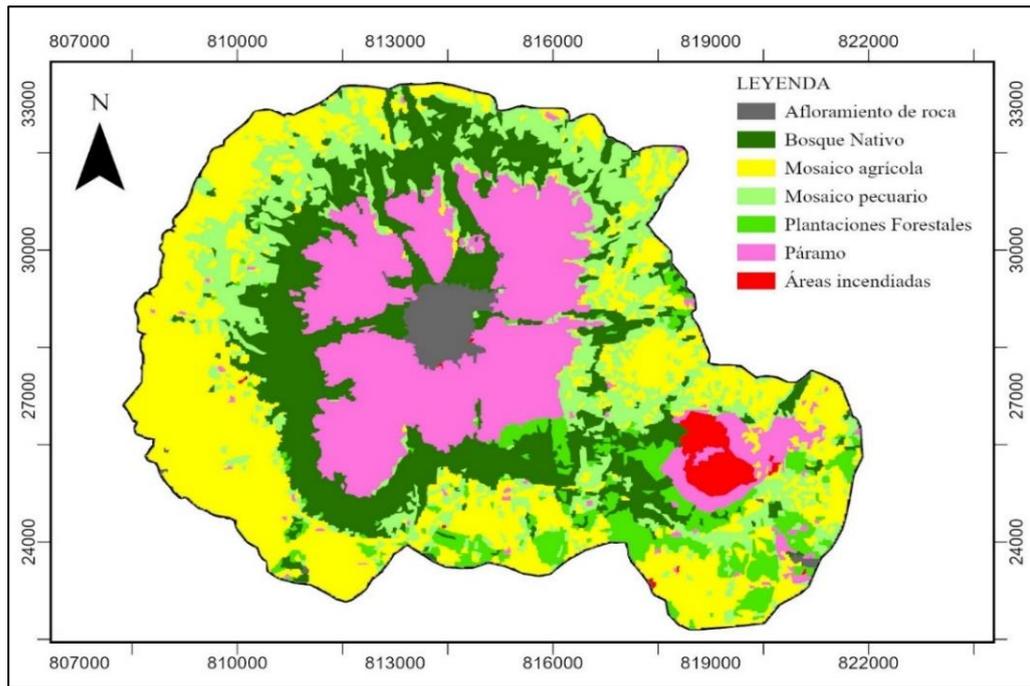
Las categorías de cobertura del suelo que tuvieron mayor superficie en el área protegida Taita Imbabura en el año 2022 fueron: Páramo y Bosque nativo las mismas que cubren el 45.74 % de la superficie total, como se muestra en la Figura 13.

Figura 13. Cobertura vegetal 2022



Las categorías de cobertura del suelo con mayor superficie en el área protegida Taita Imbabura en el año 2023 fueron: Páramo y Bosque nativo las mismas que cubren el 44.04 % de la superficie total, como se expone en la Figura 14.

Figura 14. Cobertura vegetal 2023



Entre 2014 y 2023, la cobertura vegetal del área protegida Taita Imbabura mostró cambios significativos tal como se evidencia en la Tabla 14. Es importante mencionar que las categorías de nubes, afloramientos de roca y sombras no son susceptibles a incendios, por lo que no representan un riesgo directo en este análisis. Estos cambios evidencian una transformación notable en el paisaje, marcada por la presión sobre los ecosistemas naturales y la intensificación de las actividades humanas.



Tabla 14. Cobertura vegetal anual

Cobertura	2014		2015		2016		2017		2018	
	Área (ha)	Porcentaje %	Área (ha)	Porcentaje %	Área (ha)	Porcentaje %	Área (ha)	Porcentaje %	Área (ha)	Porcentaje %
Afloramiento de roca	79.11	0.75	250.16	2.38	108.49	1.03	221.57	2.11	105.97	1.01
Bosque Nativo	1298.89	12.36	1970.7	18.74	2071.68	19.70	1928.73	18.34	2278.92	21.67
Mosaico agrícola	1718.72	16.35	3448.07	32.79	990.5	9.42	3505.73	33.33	1232.93	11.72
Mosaico pecuario	3252.75	30.94	1332.3	12.67	3390.7	32.24	1623.33	15.44	2748.88	26.14
Páramo	3747.89	35.65	2523.54	24.00	3465.54	32.95	2265.45	21.54	3301.97	31.40
Plantaciones Forestales	414.51	3.94	608.96	5.79	490.52	4.66	605.32	5.76	848.77	8.07
Nubes	0	0.00	272.07	2.59	0	0.00	0.00	0.00	0	0.00
Sombras	0	0.00	81.73	0.78	0	0.00	0.00	0.00	0	0.00
Áreas incendiadas	0	0.00	28.99	0.28	0	0.00	366.67	3.49	0	0.00
Total	10511.9	100	10516.5	100	10517.4	100	10517	100	10517.4	100.00

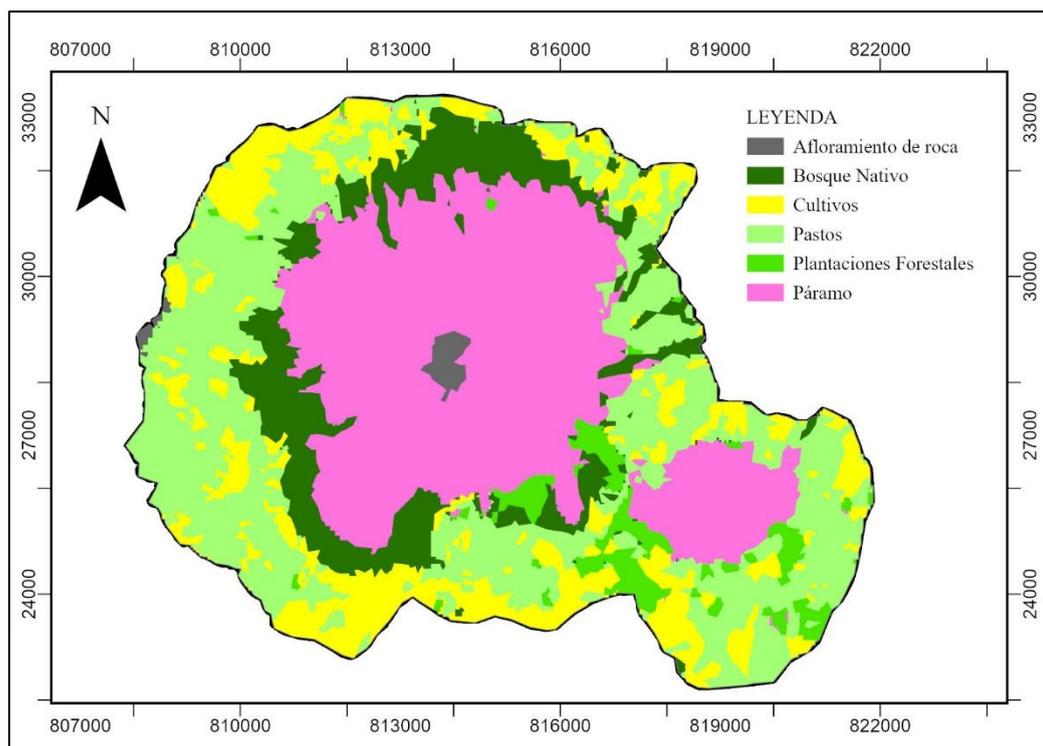
Cobertura	2019		2020		2022		2023	
	Área (ha)	Porcentaje %						
Afloramiento de roca	206.78	1.97	271.5	2.58	53.9	0.51	229.4	2.18
Bosque Nativo	2268.96	21.58	2181.88	20.75	1414.59	13.45	2286.03	21.74
Mosaico agrícola	3081.44	29.30	2940.07	27.96	4315.33	41.03	3075.38	29.24
Mosaico pecuario	1675.77	15.94	1994.93	18.97	1070.94	10.18	1764.78	16.78
Páramo	2434.42	23.15	2196.72	20.89	3395.74	32.29	2345.78	22.30
Plantaciones Forestales	495.09	4.71	584.61	5.56	266.93	2.54	657.17	6.25
Nubes	166.71	1.59	169.55	1.61	0	0.00	0	0.00
Sombras	106.5	1.01	104.45	0.99	0	0.00	0	0.00
Áreas incendiadas	80.14	0.76	72.53	0.69	0	0.00	158.97	1.51
Total	10515.8	100	10516.2	100	10517.4	100	10517.5	100

Estos cambios destacan la necesidad urgente de implementar medidas de conservación para proteger los ecosistemas de la zona ya que cuando existe altas temperaturas y las sequías están reduciendo la humedad y aumentando la disponibilidad de combustible, hace que la vegetación se seque y se vuelva más propensa a arder, lo convierte a ciertas zonas en áreas de alto riesgo de incendios (Cogollo, 2020).

3.2.2. Uso del suelo

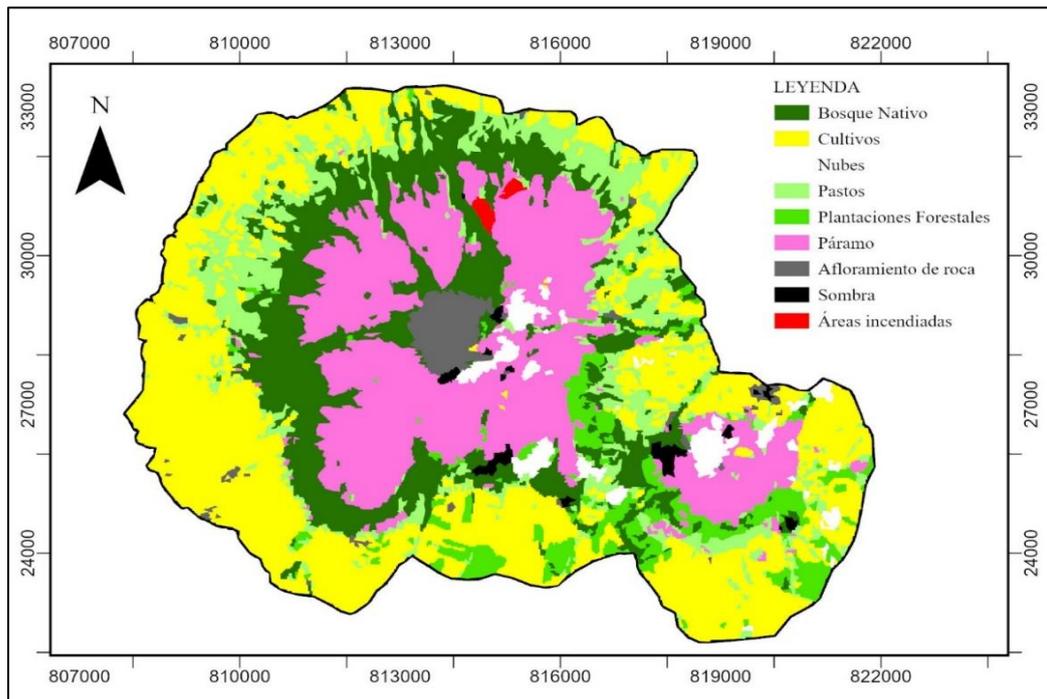
En el área protegida Taita Imbabura se identificaron diversos usos del suelo en el año 2014 como: Pastos, Cultivos y Plantaciones forestales siendo estas categorías las que tienen mayor superficie cubriendo el 51.24 % del área total, como indica la Figura 15.

Figura 15. *Uso del suelo 2014*



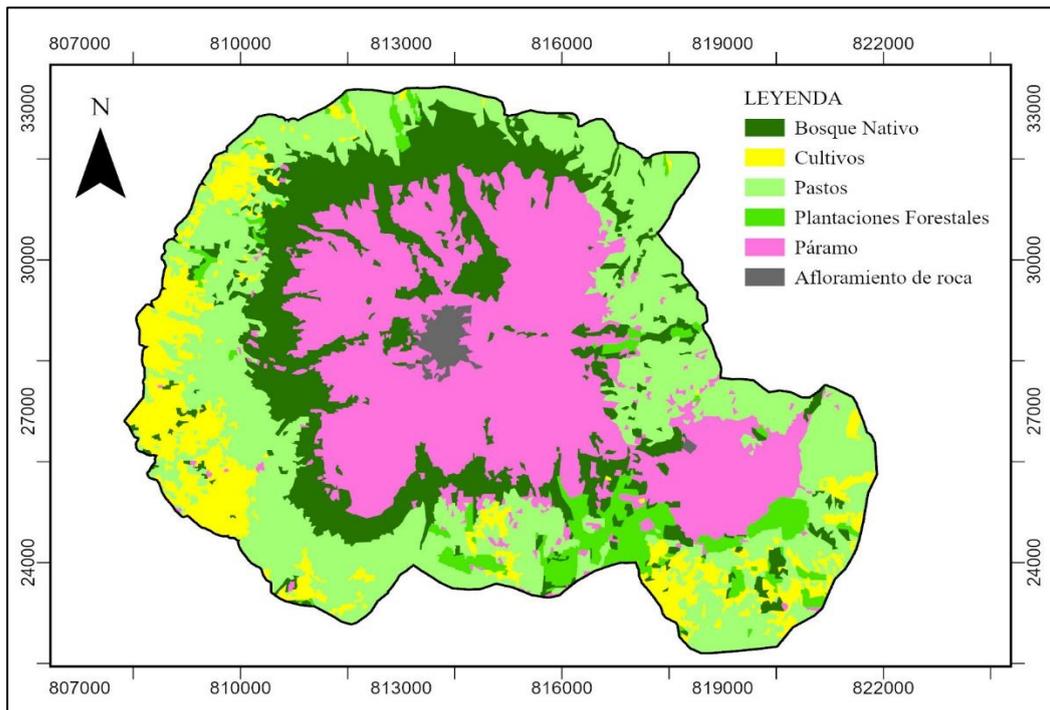
En el área protegida Taita Imbabura se identificaron diversos usos del suelo en el año 2015 como: Cultivos, Pastos y Plantaciones forestales siendo estas categorías con mayor superficie cubriendo el 51.25 % del área total, como muestra la Figura 16.

Figura 16. *Uso del suelo 2015*



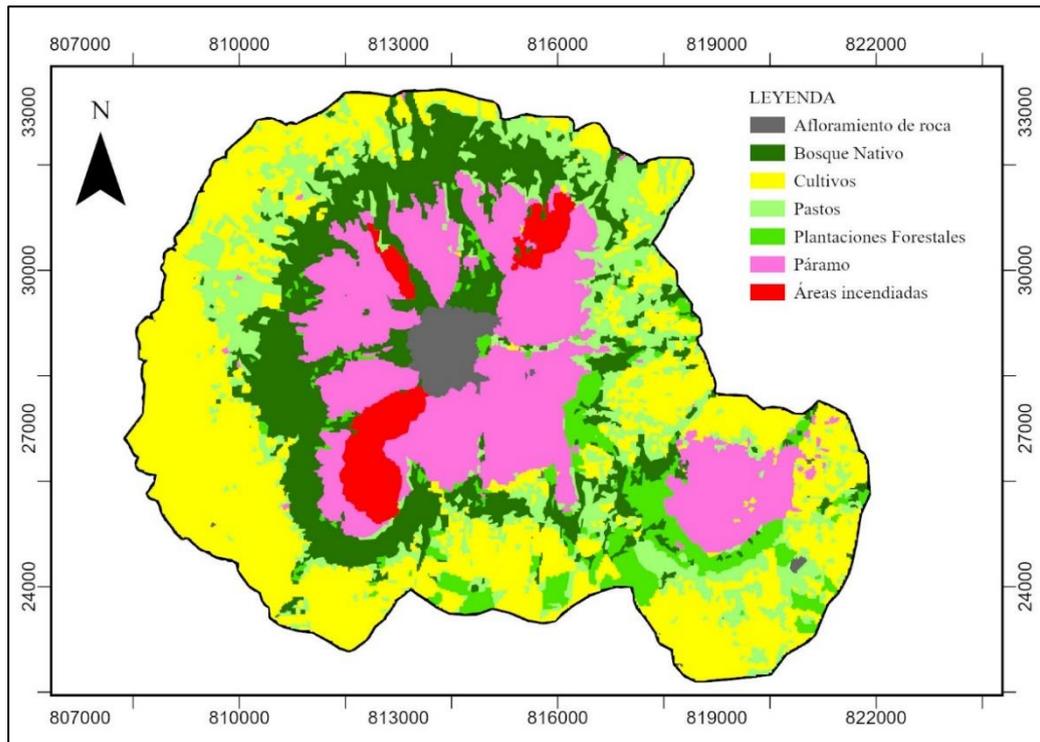
En el área protegida Taita Imbabura se identificaron diversos usos del suelo en el año 2016 como: Pastos, Cultivos y Plantaciones forestales siendo las áreas con mayor superficie cubriendo el 46.32 % del área total como se expone la Figura 17.

Figura 17. *Uso del suelo 2016*



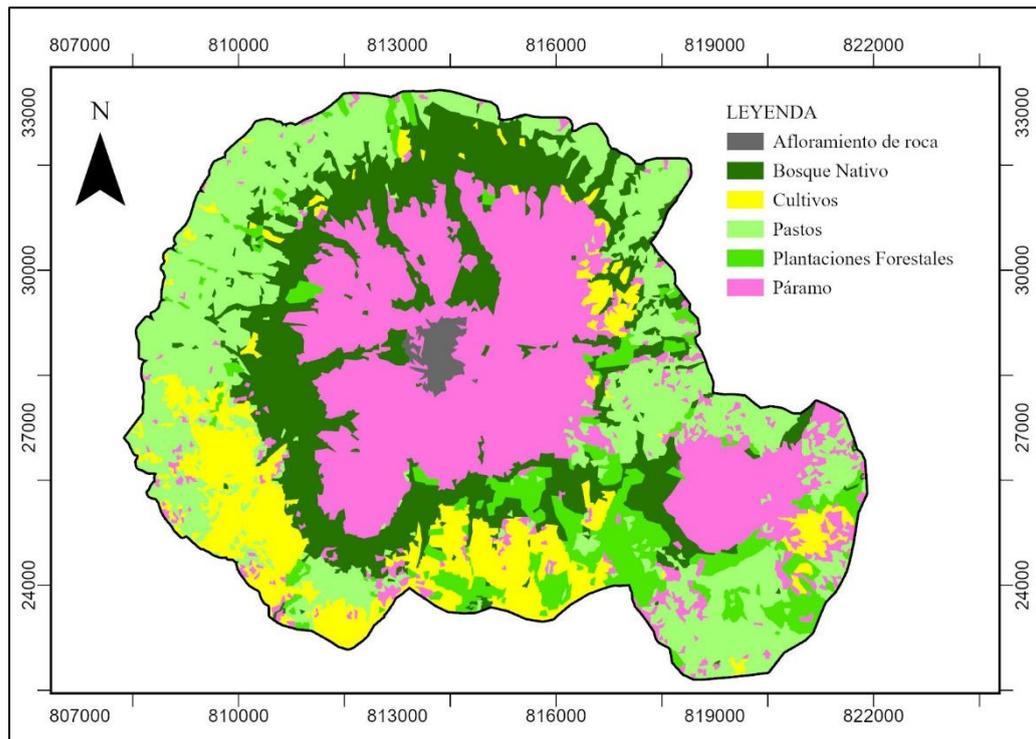
En el área protegida Taita Imbabura se identificaron diversos usos del suelo en el año 2017 como: Cultivos, Pastos y Plantaciones forestales siendo estas categorías con mayor superficie el cual cubre el 54.53 % del área total como muestra la Figura 18.

Figura 18. *Uso del suelo 2017*



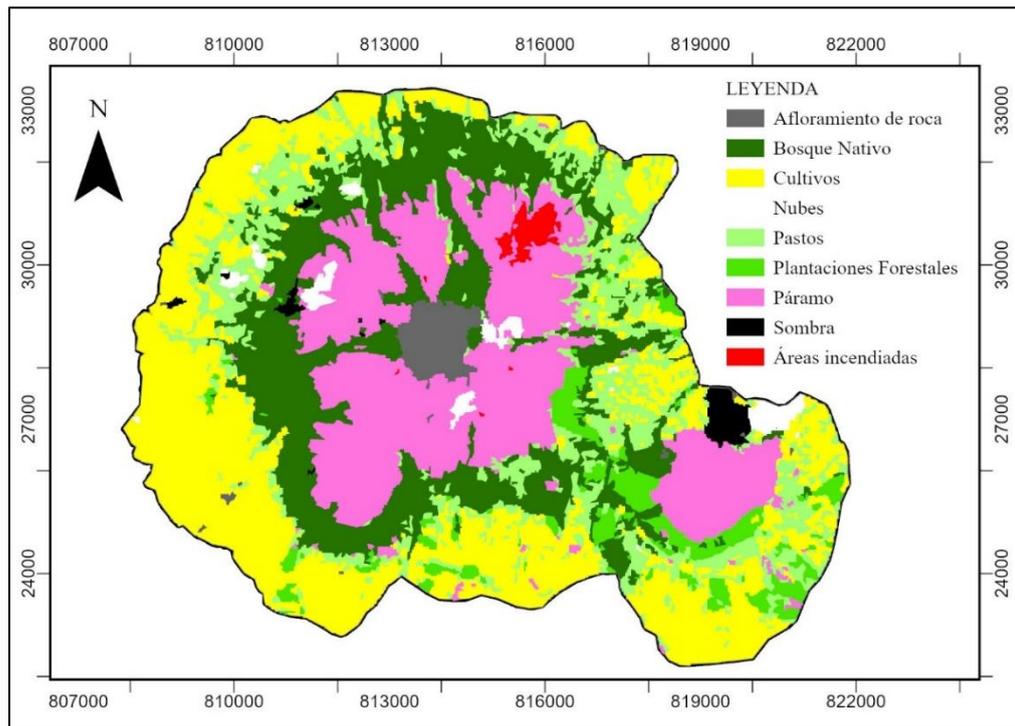
En el área protegida Taita Imbabura se identificaron diversos usos del suelo en el año 2018 como: Pastos, Cultivos y Plantaciones forestales siendo las categorías con mayor superficie, cubriendo el 45.93 % del área total como muestra la Figura 19.

Figura 19. *Uso del suelo 2018*



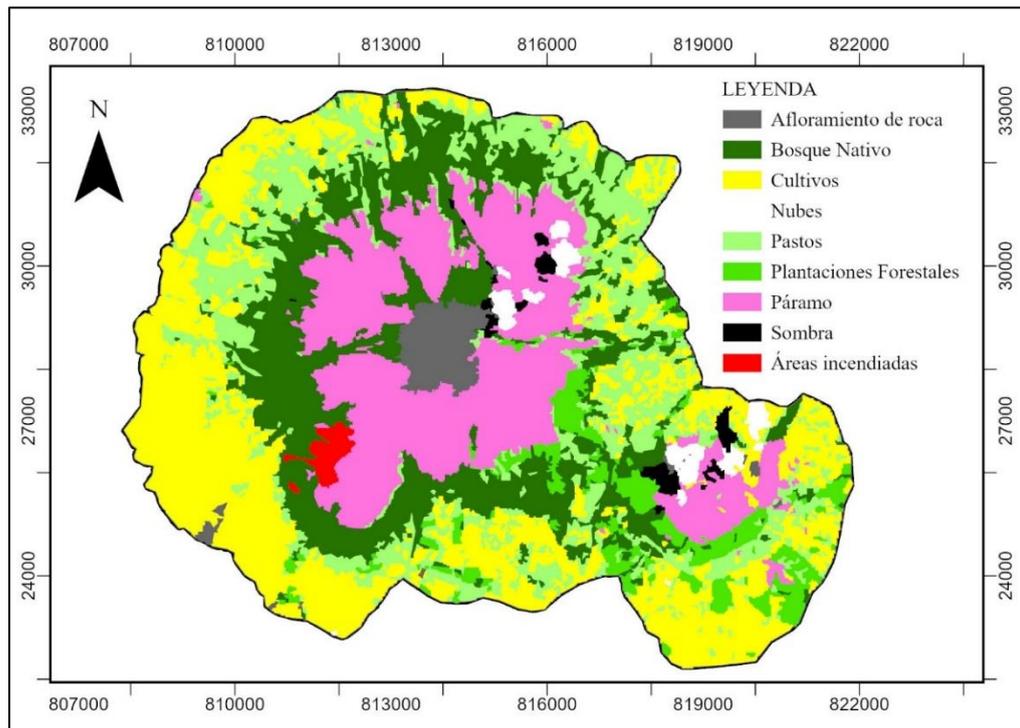
En el área protegida Taita Imbabura se identificaron diversos usos del suelo en el año 2019 como: Cultivos, Pastos y Plantaciones forestales siendo estas categorías con mayor superficie cubriendo el 45.95 % del área total, como expone la Figura 20.

Figura 20. *Uso del suelo 2019*



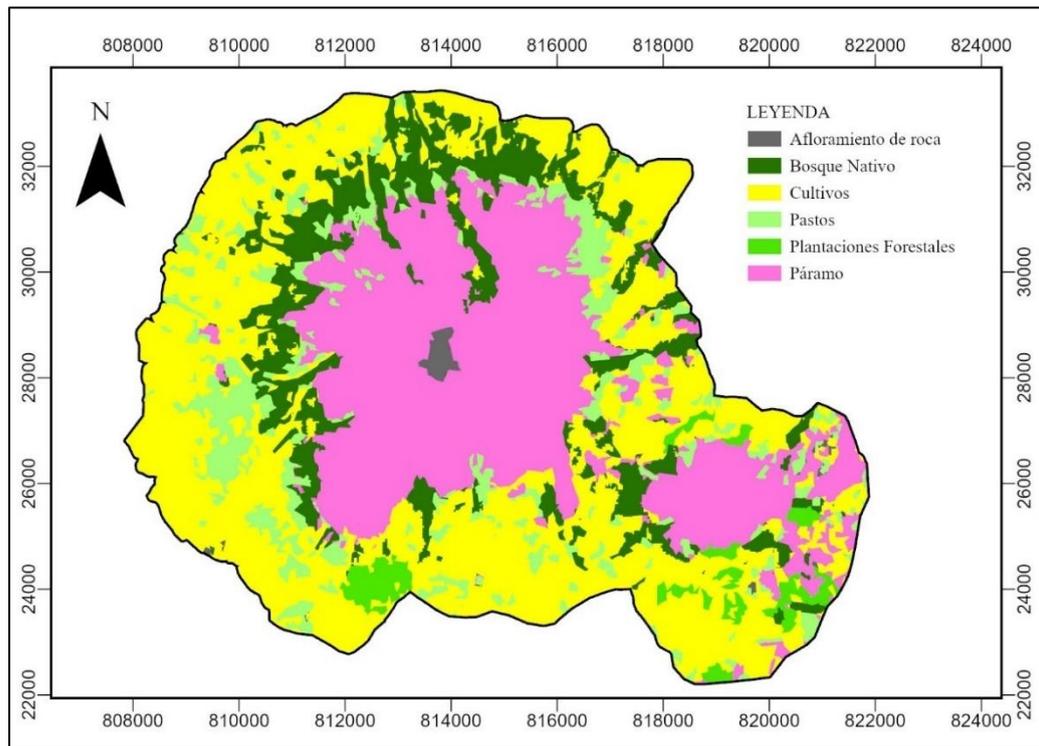
En el área protegida Taita Imbabura se identificaron diversos usos del suelo en el año 2020 como: Cultivos, Pastos y Plantaciones forestales siendo las áreas con mayor superficie cubriendo el 52.49 % del área total, como muestra la Figura 21.

Figura 21. *Uso del suelo 2020*



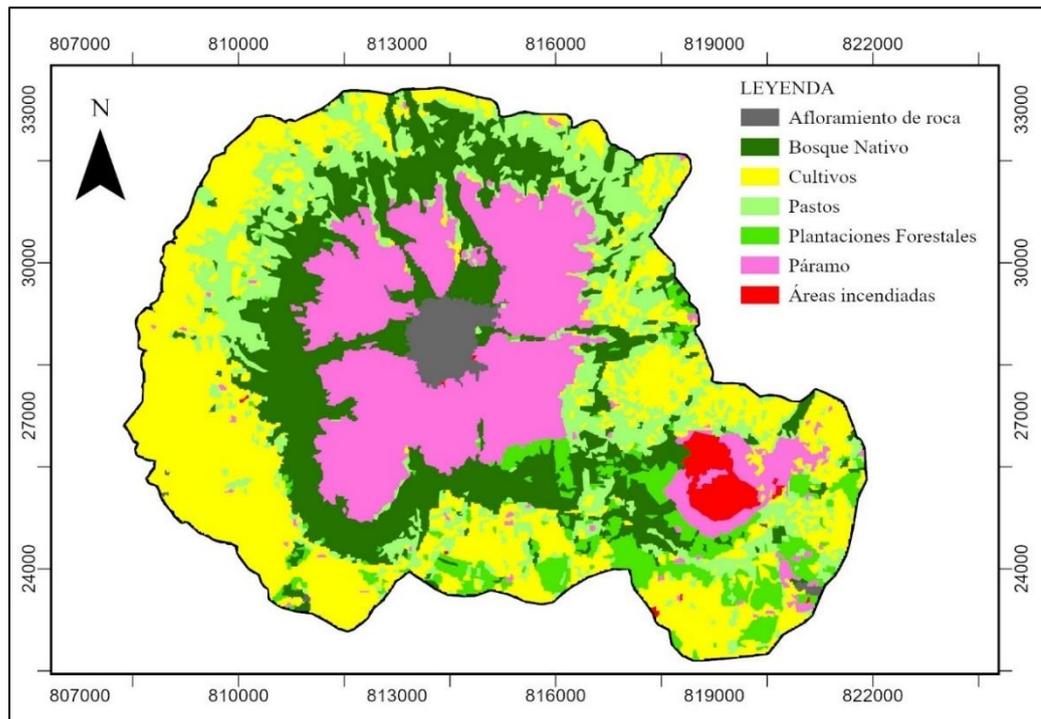
En el área protegida Taita Imbabura se identificaron diversos usos del suelo en el año 2022 como: Cultivos, Pastos y Plantaciones forestales siendo las categorías con mayor superficie el cual cubren el 53.75 % del área total, como indica la Figura 22.

Figura 22. Uso del suelo 2022



En el área protegida Taita Imbabura se identificaron diversos usos del suelo en el año 2023 como: Cultivos, Pastos y Plantaciones forestales siendo las categorías con mayor superficie ya que cubren el 52.27 % del área total como muestra la Figura 23.

Figura 23. *Uso del suelo 2023*



El uso del suelo en el Área Protegida Taita Imbabura en el periodo 2014-2023 se detectaron variaciones significativas como se indica en la Tabla 15.



Tabla 15. Variación del uso de suelo

Uso suelo	2014		2015		2016		2017		2018	
	Área (ha)	Porcentaje %								
Afloramiento de roca	79.11	0.75	250.16	2.38	108.49	1.03	221.57	2.11	105.97	1.01
Bosque Nativo	1298.89	12.36	1970.7	18.74	2071.68	19.70	1928.73	18.34	2278.92	21.67
Cultivos	1718.72	16.35	3448.07	32.79	990.5	9.42	3505.73	33.33	1232.93	11.72
Páramo	3747.89	35.65	2523.54	24.00	3465.54	32.95	2265.45	21.54	3301.97	31.40
Pastos	3252.75	30.94	1332.3	12.67	3390.7	32.24	1623.33	15.44	2748.88	26.14
Plantaciones Forestales	414.51	3.94	608.96	5.79	490.52	4.66	605.32	5.76	848.77	8.07
Nubes	0	0.00	272.07	2.59	0	0.00	0	0.00	0	0.00
Sombra	0	0.00	81.73	0.78	0	0.00	0	0.00	0	0.00
Áreas incendiadas	0	0.00	28.99	0.28	0	0.00	366.67	3.49	0	0.00
Total	10511.87	100	10516.52	100	10517.43	100	10517	100	10517.44	100

Uso suelo	2019		2020		2022		2023	
	Área (ha)	Porcentaje %						
Afloramiento de roca	206.78	1.97	271.5	2.62	53.9	0.51	229.4	2.18
Bosque Nativo	2268.96	21.58	2181.88	21.09	1414.59	13.45	2286.03	21.74
Cultivos	3081.44	29.30	2940.07	28.42	4315.97	41.04	3075.38	29.24
Páramo	2434.42	23.15	2196.72	21.23	3395.11	32.28	2345.78	22.30
Pastos	1675.77	15.94	1994.93	19.28	1070.94	10.18	1764.78	16.78
Plantaciones Forestales	495.09	4.71	584.61	5.65	266.93	2.54	657.17	6.25
Nubes	166.71	1.59	0	0.00	0	0.00	0	0.00
Sombra	106.5	1.01	104.45	1.01	0	0.00	0	0.00
Áreas incendiadas	80.14	0.76	72.53	0.70	0	0.00	158.97	1.51
Total	10515.81	100	10346.69	100	10517.44	100	10517.51	100



La pérdida inicial de bosque nativo y su posterior recuperación, así como las fluctuaciones en los ecosistemas de páramo, reflejan la necesidad de implementar medidas sostenibles para proteger la biodiversidad y mitigar los efectos de las actividades humanas y los eventos extremos en el territorio. Echandía Arbeláez (2016) expone la presión antrópica en los ecosistemas de alta montaña enfrentan fuertes presiones de origen humano y climático, lo que los convierte en sistemas naturales particularmente frágiles y vulnerables. Este cambio puede atribuirse a la creciente demanda de tierras para cultivos, impulsada por factores socioeconómicos locales. “Una causa frecuente de los incendios forestales es la presión para cambiar el uso del suelo con el fin de establecer asentamientos humanos” (Pazmiño, 2019).

3.3. Factores topográficos

Pendiente del terreno

La distribución de pendientes en el área protegida Taita Imbabura, según (IGAC, 2013) se clasificada en seis rangos de inclinación, donde se localizan en la parte alta del volcán Imbabura, como se visualiza en la Figura 24.

El área protegida Taita Imbabura existe una pendiente de 25% a 50%, clasificado como "muy montañoso", donde se observa el valor más alto en porcentaje es decir que abarca el 35.67% del área total que equivale a 3703.52 como muestra en la Tabla 16. Esta categoría, se caracteriza por un relieve inclinado y montañoso, lo que tiene implicaciones importantes en cuanto a la susceptibilidad a incendios forestales. Una inclinación hasta de 50% favorece una rápida propagación del fuego debido al calor convectivo y eleva la posibilidad de que materiales en llamas desciendan por la pendiente (CONAFOR, 2020).



Figura 24. Pendientes del área protegida Taita Imbabura

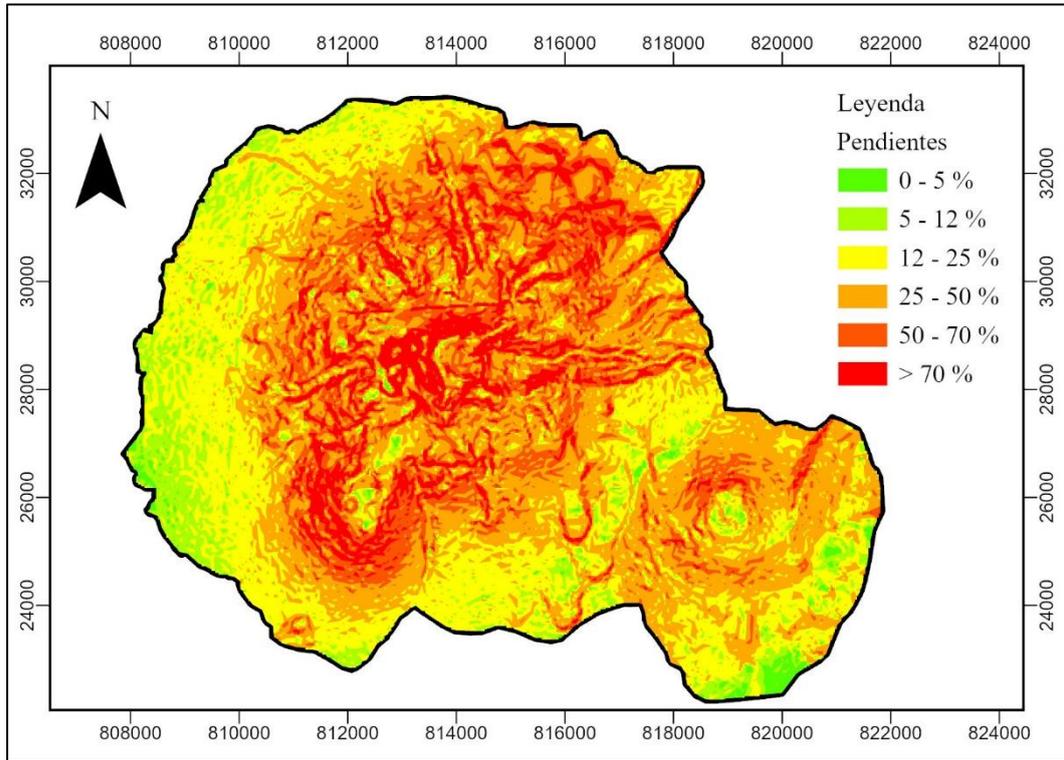


Tabla 16. Rango de pendientes del terreno

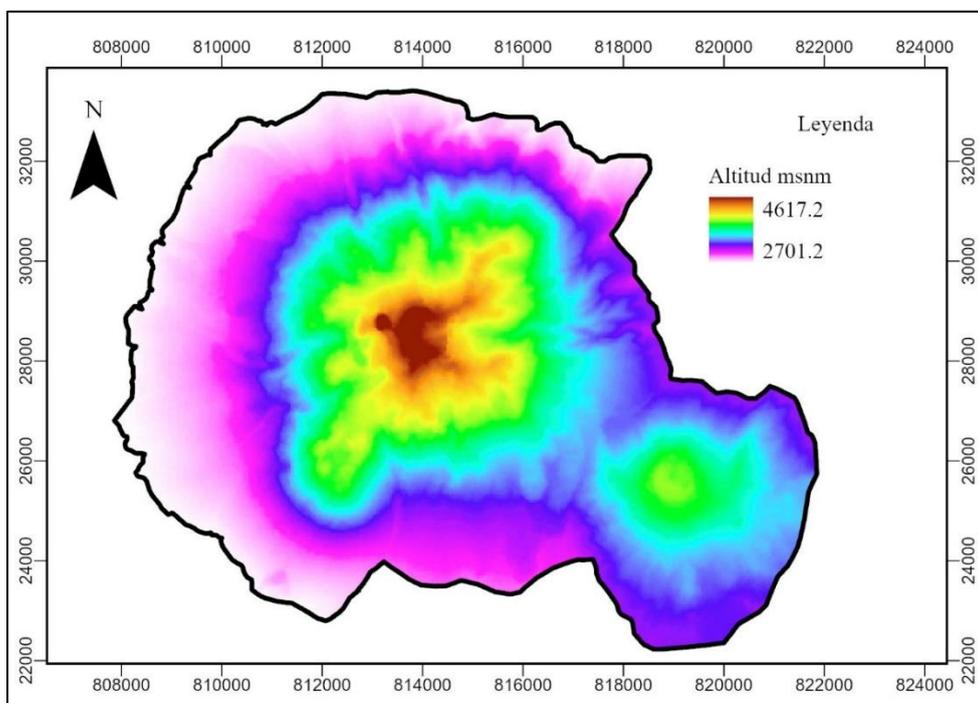
Pendiente	Rango	Relieve	Área (ha)	Porcentaje (%)
1	0 – 5 %	Plano	123.86	1.19
2	5 – 12 %	Ligeramente ondulado	759.76	7.31
3	12 – 25 %	Montañoso	2848.13	27.43
4	25 – 50 %	Muy montañoso	3703.52	35.67
5	50 – 70 %	Escarpado	1824.2	17.57
6	> 70 %	Muy Escarpado	1122.43	10.81

El área protegida Taita Imbabura se caracteriza por un relieve predominantemente montañoso y escarpado, resultado de su origen volcánico y procesos tectónicos. Estas pendientes pronunciadas, junto con la cobertura vegetal, aumentan la susceptibilidad a incendios forestales, destacando la necesidad de estrategias de manejo sostenible para prevenir riesgos y conservar los ecosistemas.

Altitud del terreno

En el área protegida se obtuvo un resultado una altitud entre 2701.2 y 4617.2 msnm que refleja una gran variabilidad altitudinal, típica de ecosistemas montañosos andinos evidenciando en la Figura 25. Arias, Chuma, Coronado y Jácome (2024) comenta que al aumentar la altitud disminuye el riesgo de incendio a las coberturas vegetales. Según Arias Muñoz et al. (2024), el riesgo de incendio disminuye a mayor altitud debido a condiciones más frías y húmedas, lo que reduce la inflamabilidad de las coberturas vegetales. Sin embargo, este patrón puede verse influenciado por otros factores, como la pendiente.

Figura 25. *Altitud del área protegida Taita Imbabura*



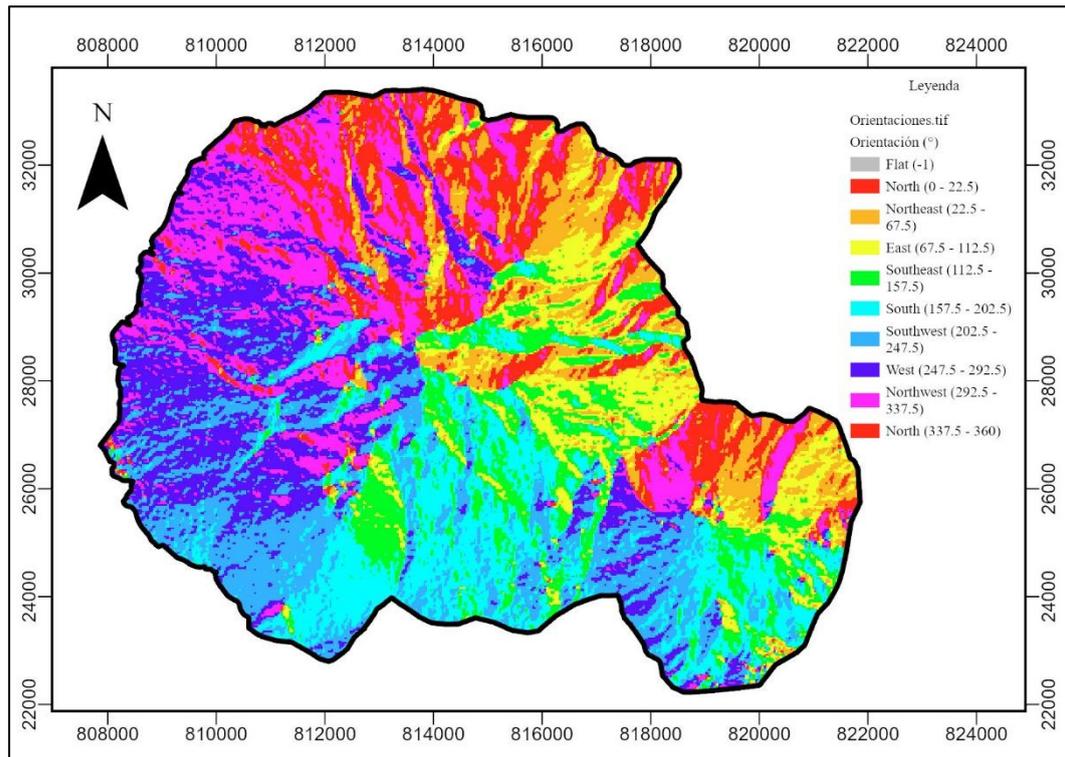


Orrillo, Coronado, Rodríguez y De Almeida (2021) menciona que, esta variabilidad en la altitud favorece la existencia de diferentes tipos de vegetación y hábitats, desde zonas más cálidas y secas en las partes bajas hasta áreas más frías y húmedas en las elevaciones superiores esta diversidad altitudinal también aumenta la susceptibilidad de incendios forestales, especialmente en las zonas de transición entre el bosque y el páramo.

Orientación del terreno

El área protegida Taita Imbabura muestra una variada distribución como indica la Figura 26. La orientación Norte ($337.5-360^\circ$) destaca como la más predominante, seguida por el Noreste ($22.5-67.5^\circ$) y el Noroeste ($292.5 - 337.5^\circ$) estas orientaciones, con sus características de exposición solar, podrían influir en la vegetación y en los patrones climáticos locales. Las orientaciones Este ($67.5-112.5^\circ$) y Oeste ($247.5-292.5^\circ$) presentan una menor frecuencia y la orientación Sur ($157.5-202.5^\circ$) y Sureste ($112.5-157.5^\circ$) se encuentran en una proporción aún menor. Estas variaciones de las laderas según Arias Muñoz, Chuma, Coronado y Jácome (2024) “son factores claves en la propagación de los incendios, algunas estrategias viables serían los cortafuegos, las torres de observación y monitoreo meteorológico constante de las zonas con susceptibilidad alta y muy alta para mejorar la toma de decisiones en base a datos técnico-científicos”.

Figura 26. Orientación del terreno



En el área la orientación Norte es un factor clave en la ocurrencia de incendios forestales debido a la influencia de la radiación solar sobre la humedad de los combustibles vegetales y del ambiente. Según Vilchis (2015), las áreas expuestas a mayor radiación solar tienden a tener un contenido de humedad más bajo, lo que incrementa su inflamabilidad.

3.4. Factores climáticos

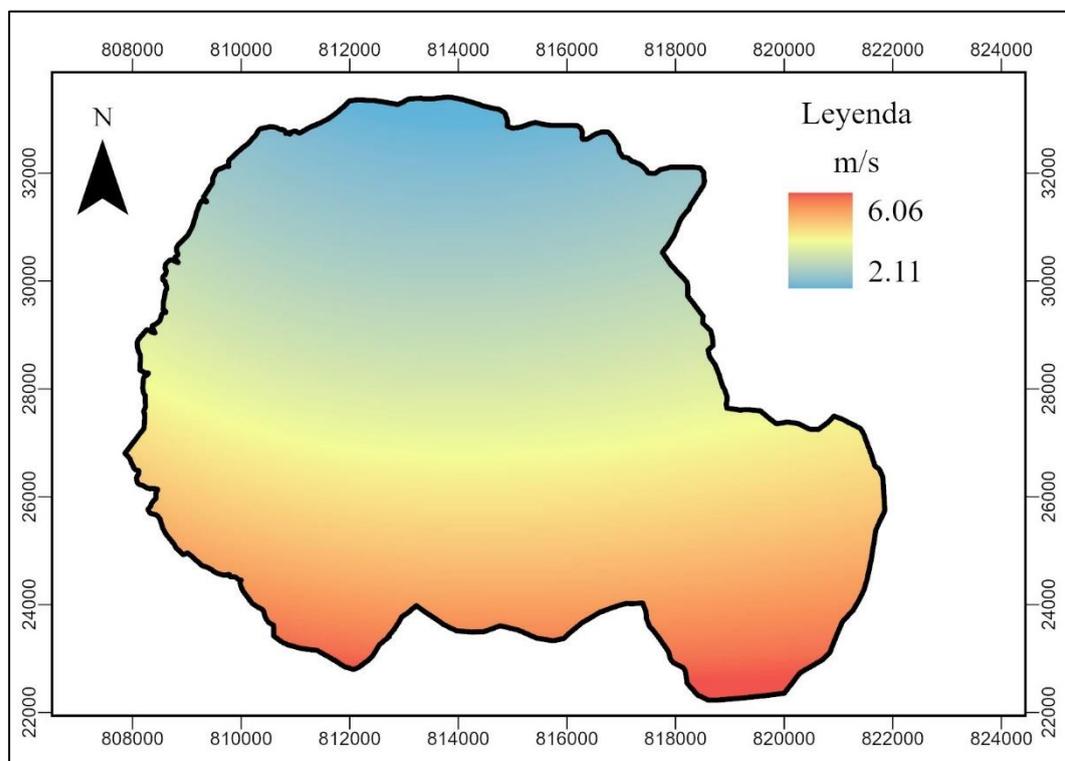
Velocidad del viento

Para obtener este resultado se utilizó la información de las estaciones de temperatura más cercanas, proporcionada por INAMHI (2013), para determinar la velocidad del viento en el área de estudio, utilizando datos de las estaciones de Quito, Otavalo, Cahuasqui-FAO, Tomalón-Tabacundo, Inguincho, Papallacta y Olmedo-Pichincha, debido a su proximidad geográfica. Los resultados obtenidos para la velocidad del viento en el área protegida Taita Imbabura, varían entre 2.11 y 6.06 m/s como indica la Figura 27, indican una presencia moderada a fuerte de viento en el sitio.



“Un viento más fuerte acelera la propagación del fuego al aportar oxígeno, aplanar la llama y precalentar el combustible cercano, generando nuevos focos. De día, el viento sube por las laderas a 10-20 km/h debido al calor solar; de noche, desciende con menor intensidad” (Torres Girardi, 2007). Por esta razón, los incendios se propagan más rápidamente cuando el viento está a favor o cuando sopla con fuerza, en comparación con cuando sopla en contra o no hay viento. Cuando el viento sopla ladera arriba, se suma al efecto de la pendiente, acelerando aún más la propagación del fuego (Jane Kapler, 2018).

Figura 27. *Velocidad del viento*



El viento en el área protegida Taita Imbabura se debe a las montañas, que hacen que el aire se mueva más rápido al pasar por valles y laderas. Además, las diferencias de temperatura entre el día y la noche generan corrientes que también aumentan la velocidad del viento.

3.5. Susceptibilidad temporal de incendios forestales

3.5.1. Susceptibilidad 2014



La distribución de la susceptibilidad a incendios se indica en la Figura 28. La categoría muy baja se localiza en áreas planas o ligeramente onduladas (66.15 ha), situadas principalmente en altitudes más bajas (2701.2 m.s.n.m.) y donde predominan cultivos y pastos. La categoría baja abarca 4455.72 ha y se encuentra en terrenos ligeramente ondulados y montañosos, vinculados a actividades agrícolas y ganaderas. La categoría moderada, que cubre 2309.91 ha, se distribuye en pendientes montañosas y muy montañosas, asociadas con el bosque nativo en altitudes intermedias.

Por su parte, la categoría alta ocupa 3481.26 ha y predomina en terrenos muy montañosos y escarpados, especialmente en altitudes mayores (hasta 4617.2 m.s.n.m.), caracterizados por páramo y vegetación arbustiva. La categoría no aplica corresponde a áreas de afloramientos rocosos (64.85 ha) con poca o nula vegetación. La orientación predominante del terreno hacia el norte (337.5° - 360°) y las velocidades del viento que oscilan entre 2.11 y 6.06 m/s incrementan la susceptibilidad en estas zonas, especialmente en pendientes escarpadas, ya que estas condiciones favorecen la propagación del fuego como se observa en la Tabla 17.

Figura 28. Susceptibilidad a incendios forestales 2014

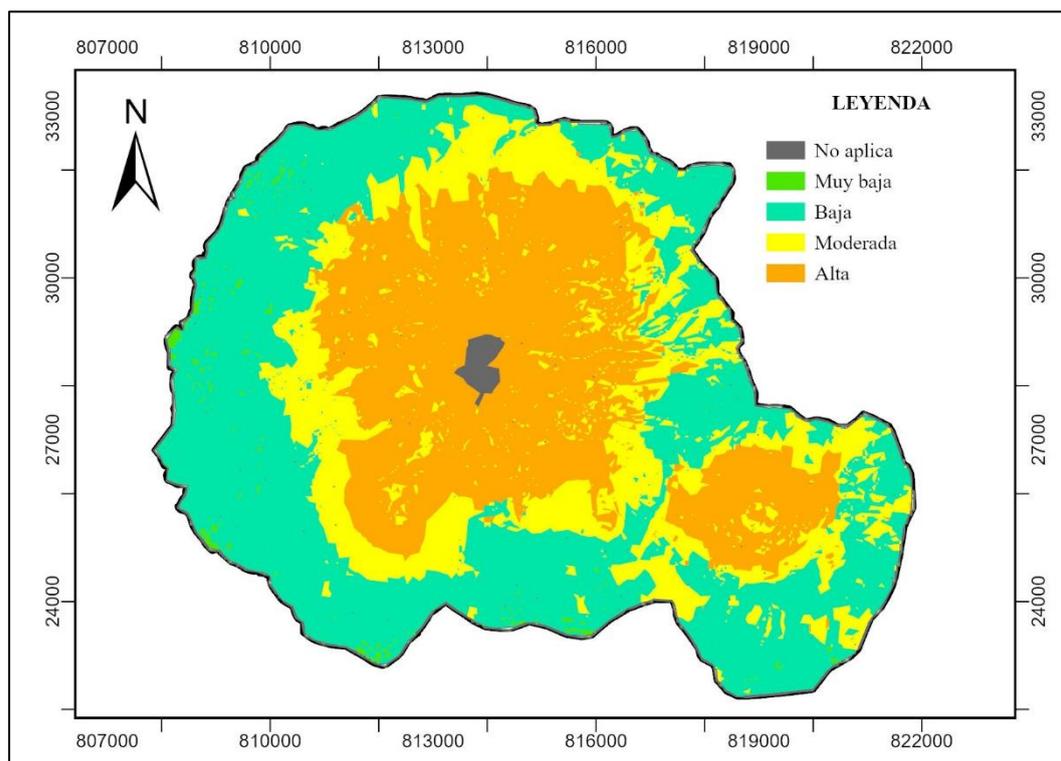


Tabla 17. Susceptibilidad 2014

2014		
Susceptibilidad	Área (ha)	Porcentaje (%)
No aplica	64.85	0.62
Muy baja	66.15	0.64
Baja	4455.72	42.93
Moderada	2309.91	22.26
Alta	3481.26	33.54
Total	10377.89	100

3.5.2. Susceptibilidad 2015

En 2015, la susceptibilidad a incendios en el área protegida Taita Imbabura presentó una distribución influenciada por el relieve y las características ambientales del sitio el cual muestra en la Figura 29. Las áreas de susceptibilidad muy baja, que comprenden 181.69, se encuentran principalmente en terrenos planos o ligeramente ondulados con altitudes más bajas (2701.2 m.s.n.m.), dominadas por cultivos y pastos. En la Tabla 18 las zonas de susceptibilidad baja, que

abarcan 4554.92 ha, están asociadas a pendientes ligeramente onduladas y montañosas, donde predominan actividades agrícolas y ganaderas.

La susceptibilidad moderada, con 2930.35 ha, se distribuye en terrenos montañosos y muy montañosos, relacionados con el bosque nativo en altitudes intermedias. La categoría alta, que cubre 2430.31 ha, se localiza en pendientes más pronunciadas, como zonas muy montañosas y escarpadas, donde predominan el páramo y la vegetación arbustiva en altitudes superiores (hasta 4617.2 m.s.n.m.). Por último, la categoría "no aplica" con 279.33 ha, corresponde a afloramientos rocosos con escasa o nula cobertura vegetal. Además, la orientación predominante del terreno hacia el norte (337.5° - 360°) y las velocidades del viento de 2.11 a 6.06 m/s favorecen la propagación del fuego, especialmente en zonas con pendientes escarpadas.

Figura 29. *Susceptibilidad a incendios forestales 2015*

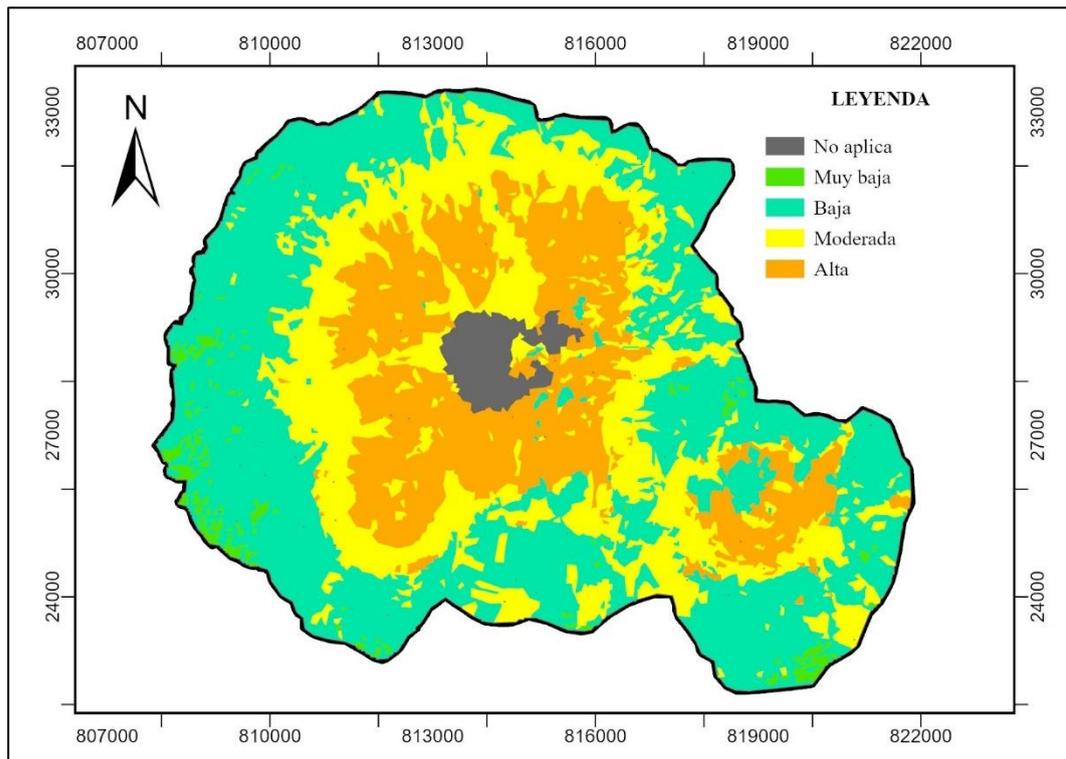


Tabla 18. Susceptibilidad 2015

	2015	
Susceptibilidad	Área (ha)	Porcentaje (%)
No aplica	279.33	2.69
Muy baja	181.69	1.75
Baja	4554.92	43.90
Moderada	2930.35	28.24
Alta	2430.31	23.42
Total	10376.6	100

3.5.3. Susceptibilidad 2016

La distribución espacial de la susceptibilidad a incendios se indica en la Figura 30, donde se observa que la categoría muy baja con 83.87 ha, se encuentra en las laderas planas y ligeramente onduladas, con pendientes suaves y áreas de vegetación menos densa o cultivada. La categoría baja con 3807.53 ha, se distribuye principalmente en las laderas montañosas y ligeramente onduladas, áreas donde predominan bosques nativos y vegetación menos densa, que ofrecen cierta resistencia a la propagación del fuego debido a la moderada inclinación del terreno. La categoría moderada con 3240.01 ha, se localiza principalmente en las zonas muy montañosas, donde las pendientes más pronunciadas y el tipo de relieve facilitan la propagación del fuego, aunque aún pueden contener vegetación densa que actúa como barrera parcial.

La categoría alta con 3138.46 ha, se encuentra en las laderas escarpadas y muy escarpadas, áreas con pendientes superiores al 50%, donde el terreno más inclinado y la exposición al viento aumentan significativamente la vulnerabilidad a incendios, especialmente en zonas de páramo o pajonal. La categoría no aplica con 107.43 ha, corresponde a las áreas donde el relieve no es adecuado para el análisis de susceptibilidad a incendios, como afloramientos rocosos o terrenos inaccesibles para la propagación del fuego como se evidenció en la Tabla 19.

Figura 30. Susceptibilidad a incendios forestales 2016

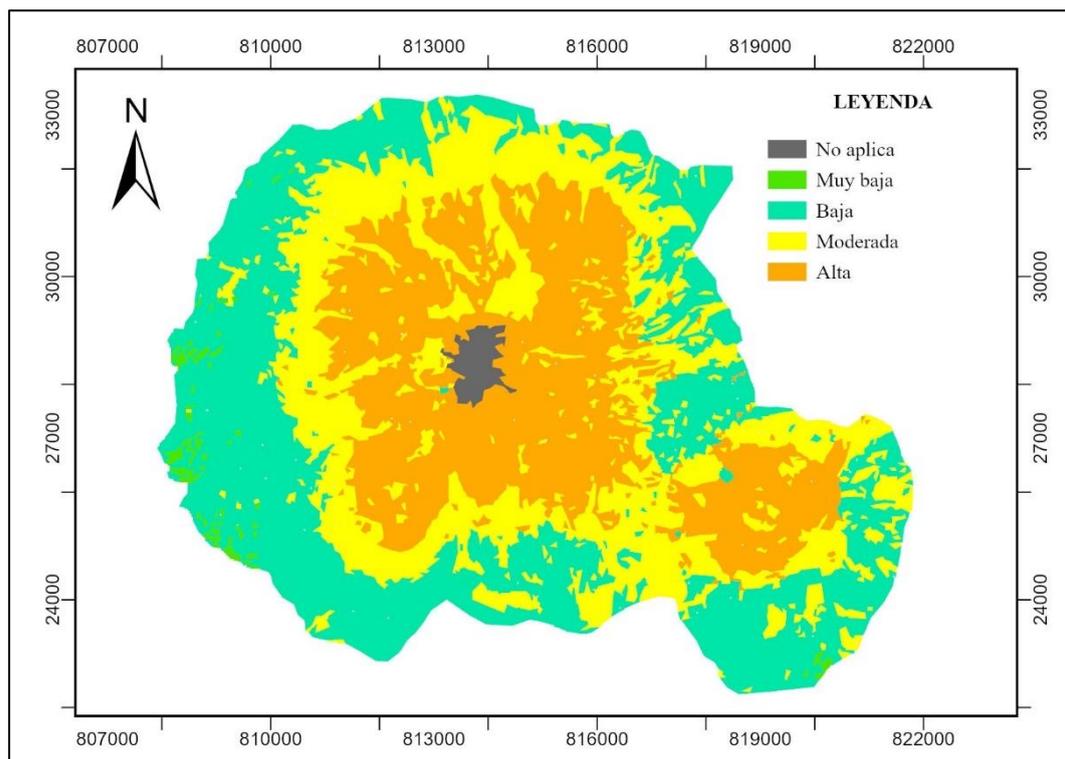


Tabla 19. Susceptibilidad 2016

	2016	
Susceptibilidad	Área (ha)	Porcentaje (%)
No aplica	107.43	1.04
Muy baja	83.87	0.81
Baja	3807.53	36.69
Moderada	3240.01	31.22
Alta	3138.46	30.24
Total	10377.3	100

3.5.4. Susceptibilidad 2017

La distribución espacial de la susceptibilidad a incendios se muestra en la Figura 31, donde se observa que la categoría muy baja es de 145.52 ha, se encuentra en las laderas planas y ligeramente onduladas, áreas con pendientes suaves y dominadas por cultivos o vegetación escasa, lo que limita la propagación del fuego. La categoría baja con 4545.61 ha, se localiza en terrenos montañosos, donde predominan bosques y vegetación menos densa, presentando una resistencia moderada al



fuego debido a las pendientes moderadas. La categoría moderada que es de 2904.45 ha, se distribuye en las zonas muy montañosas, con pendientes más pronunciadas que facilitan la propagación del fuego, aunque en algunas áreas la vegetación más densa puede ralentizar su avance.

La categoría alta con 2573.69 ha, se encuentra en las laderas escarpadas y muy escarpadas, donde las pendientes pronunciadas y la exposición al viento hacen que estas zonas sean altamente vulnerables a incendios, especialmente en áreas de páramo o pajonal. Por último, la categoría no aplica con 206.74 ha, corresponde a áreas con afloramientos rocosos o terrenos que no permiten la propagación del fuego, donde no se aplica el análisis de susceptibilidad a incendios como indica en la Tabla 20.

Figura 31. *Susceptibilidad a incendios forestales 2017*

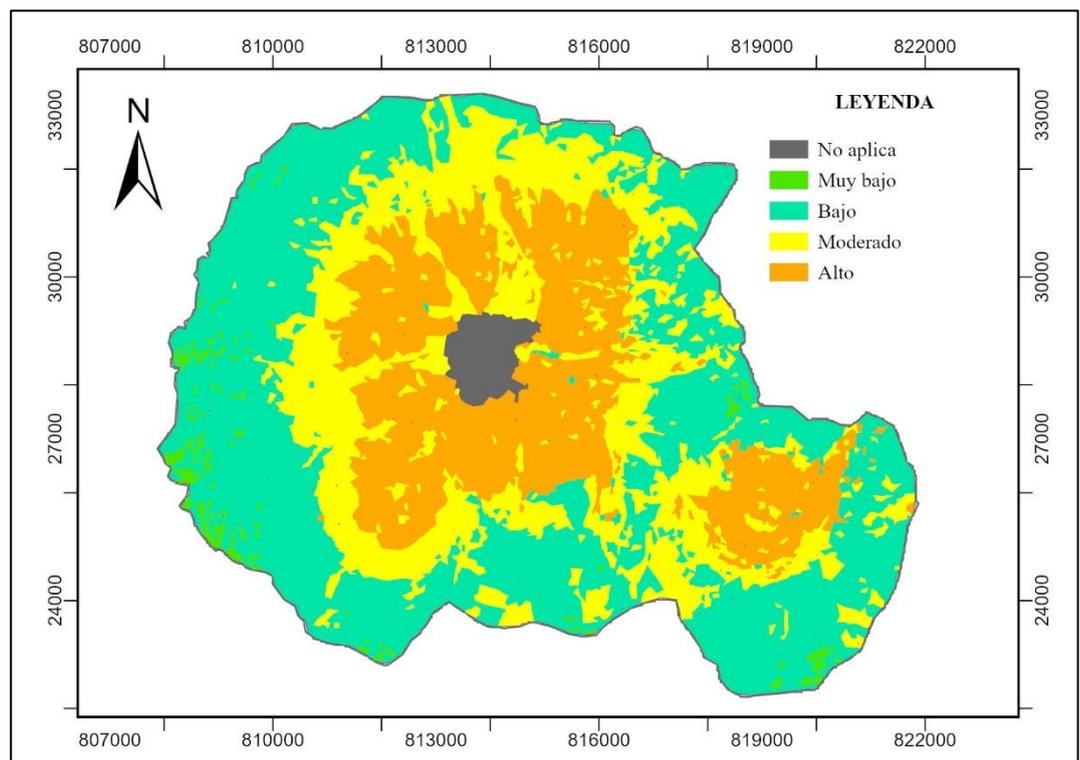




Tabla 20. Susceptibilidad 2017

2017		
Susceptibilidad	Área (ha)	Porcentaje (%)
No aplica	206.74	1.99
Muy baja	145.52	1.40
Baja	4545.61	43.81
Moderada	2904.45	27.99
Alta	2573.69	24.80
Total	10376.01	100

3.5.5. Susceptibilidad 2018

La distribución espacial de la susceptibilidad a incendios se muestra en la Figura 32, donde se observa que la categoría muy baja es de 26.41 ha, se encuentra en las áreas planas y ligeramente onduladas, con pendientes suaves, principalmente ocupadas por cultivos y vegetación dispersa, lo que dificulta la propagación del fuego. La categoría baja con 3669.42 ha, se distribuye en terrenos montañosos, donde predomina el bosque y otras coberturas vegetales que ofrecen una resistencia moderada al avance del fuego debido a la inclinación moderada del terreno.

La categoría moderada con 3660.54 ha, se encuentra en las zonas muy montañosas, con pendientes más empinadas, lo que facilita la propagación del fuego, aunque la vegetación densa en algunas áreas puede ralentizar su avance. La categoría alta que cubre 2914.83 ha, se localiza en las laderas escarpadas y muy escarpadas, donde las fuertes pendientes y la exposición al viento aumentan significativamente la vulnerabilidad a incendios, especialmente en zonas de páramo o pajonal y la categoría no aplica con 106.01 ha, se refiere a áreas con afloramientos rocosos o terrenos donde no es posible la susceptibilidad a incendios mostrando en la Tabla 21.

Figura 32. Susceptibilidad a incendios forestales 2018

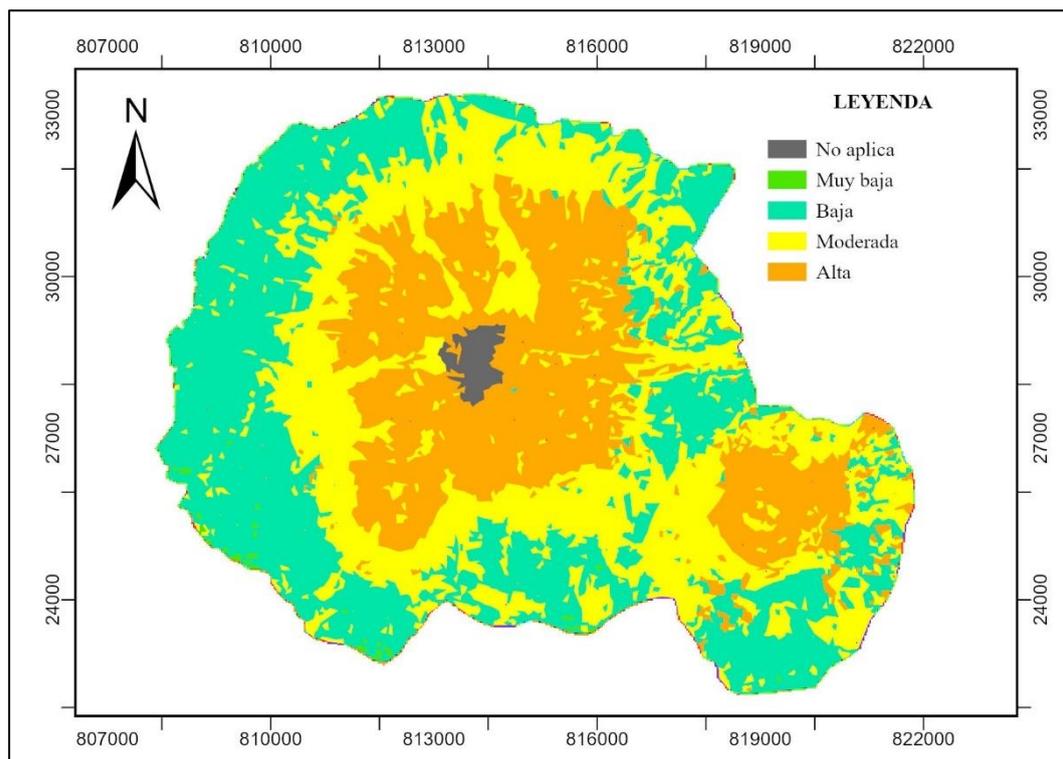


Tabla 21. Susceptibilidad 2018

2018		
Susceptibilidad	Área (ha)	Porcentaje (%)
No aplica	106.01	1.02
Muy baja	26.41	0.25
Baja	3669.42	35.36
Moderada	3660.54	35.27
Alta	2914.83	28.09
Total	10377.21	100

3.5.6. Susceptibilidad 2019

La distribución espacial de la susceptibilidad a incendios se presenta en la Figura 33 y en la Tabla 22 se observa que la categoría muy baja que cubre 182.18 ha, se localiza en las áreas planas y ligeramente onduladas, con pendientes suaves, principalmente ocupadas por cultivos y áreas con vegetación escasa, lo que dificulta la propagación del fuego. La categoría baja con 4410.13 ha, se encuentra en las zonas montañosas, donde predominan bosques y vegetación menos densa, lo que ofrece una resistencia moderada al avance del fuego debido a la inclinación moderada del terreno.



La categoría moderada con 3171.12 ha, se distribuye en las laderas muy montañosas, con pendientes más pronunciadas, donde la propagación del fuego es más probable, aunque en algunas áreas la vegetación densa puede retrasar su avance.

La categoría alta con 2393.88 ha, se localiza en las zonas escarpadas y muy escarpadas, donde las fuertes pendientes y la mayor exposición al viento hacen que estas áreas sean altamente vulnerables a incendios, especialmente en terrenos de páramo o pajonal. Por último, la categoría no aplica con 219.76 ha, corresponde a áreas con afloramientos rocosos donde no se produce incendios forestales.

Figura 33. *Susceptibilidad a incendios forestales 2019*

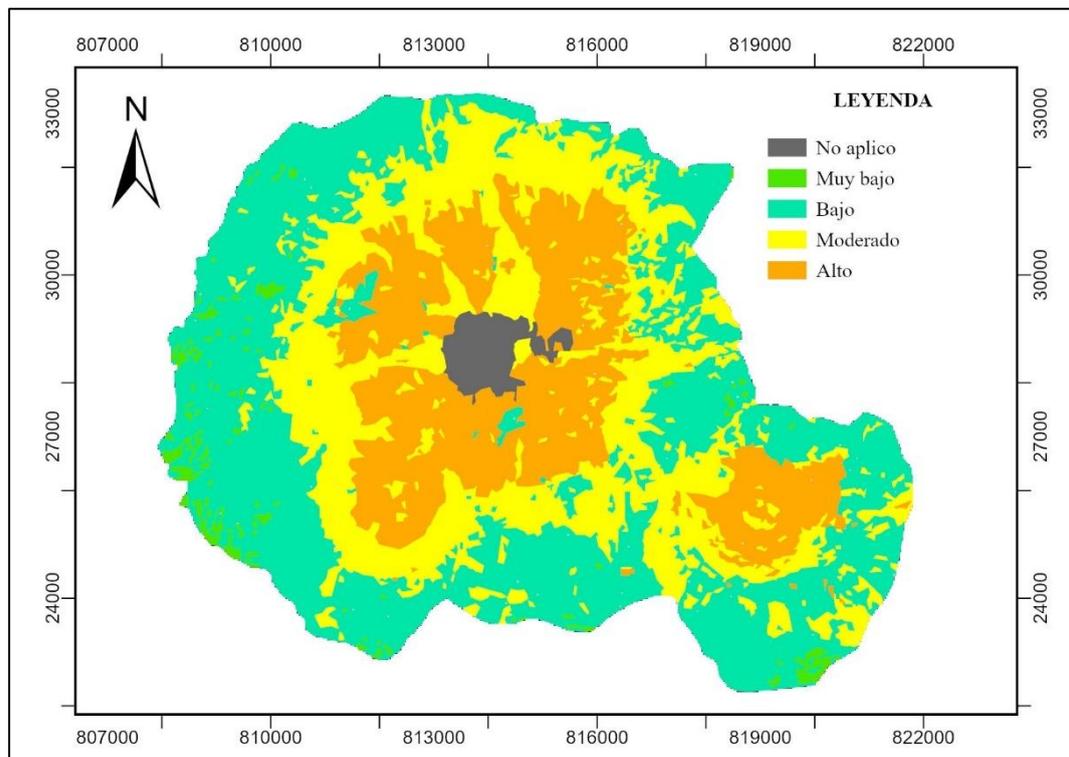




Tabla 22. Susceptibilidad 2019

2019		
Susceptibilidad	Área (ha)	Porcentaje (%)
No aplica	219.76	2.12
Muy baja	182.18	1.76
Baja	4410.13	42.50
Moderada	3171.12	30.56
Alta	2393.88	23.07
Total	10377.07	100

3.5.7. Susceptibilidad 2020

La distribución de la susceptibilidad a incendios en el área analizada está fuertemente influenciada por el relieve, las pendientes y las condiciones climáticas como indica la Figura 34. En la Tabla 23 indica que la categoría muy baja se localiza en áreas planas y ligeramente onduladas (157.29 ha), en terrenos de pendientes suaves, donde predominan cultivos y vegetación dispersa. Estas zonas se encuentran en altitudes relativamente bajas y presentan una baja vulnerabilidad a los incendios, ya que el terreno y la vegetación no favorecen su propagación. La categoría baja abarca 4527.43 ha y se encuentra principalmente en áreas montañosas, donde las pendientes moderadas y la vegetación variada, como bosques y áreas de pastizales, ofrecen una resistencia parcial al fuego. Estas zonas, aunque susceptibles a incendios, presentan mayor resistencia debido a su topografía y tipo de vegetación.

La categoría moderada cubre 3221.05 ha y se distribuye en terrenos muy montañosos, donde las pendientes más pronunciadas y las características del relieve favorecen la propagación del fuego, aunque la vegetación densa puede moderar su avance. Estas zonas se encuentran en altitudes medias y presentan una susceptibilidad moderada debido a la interacción de factores topográficos y climáticos. La categoría alta ocupa 2180.72 ha y predomina en áreas escarpadas y muy escarpadas, con fuertes pendientes y una alta exposición al viento. Estas zonas, particularmente en altitudes elevadas, suelen estar cubiertas por páramo o vegetación arbustiva, lo que incrementa su

vulnerabilidad a los incendios debido a la inclinación del terreno y la escasa capacidad para retener la humedad.

La categoría no aplica (289.71 ha) corresponde a áreas de afloramientos rocosos, donde el terreno es inaccesible para la propagación del fuego debido a la falta de vegetación. Además, las condiciones climáticas, con vientos que oscilan entre 2.11 y 6.06 m/s, y la predominancia de orientación norte (337.5° - 360°) en varias zonas, incrementan la susceptibilidad de las áreas con pendientes escarpadas, favoreciendo la propagación del fuego.

Figura 34. *Susceptibilidad a incendios forestales 2020*

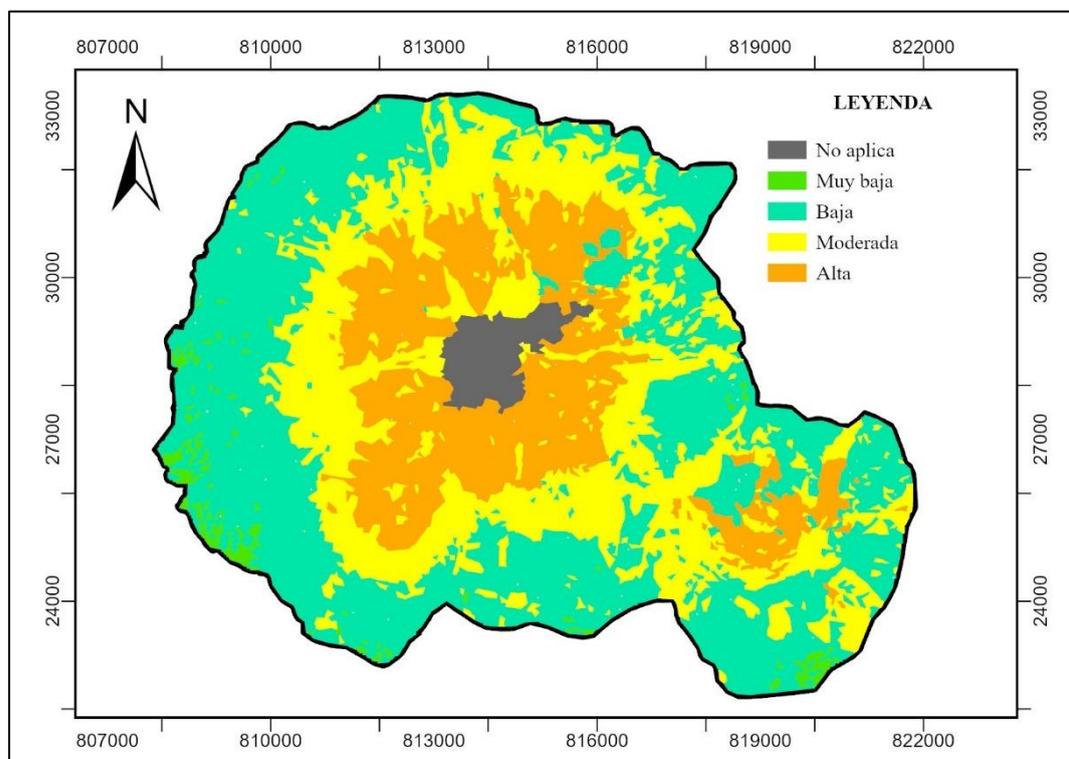




Tabla 23. Susceptibilidad 2020

2020		
Susceptibilidad	Área (ha)	Porcentaje (%)
No aplica	289.71	2.79
Muy baja	157.29	1.52
Baja	4527.43	43.63
Moderada	3221.05	31.04
Alta	2180.72	21.02
Total	10376.2	100

3.5.8. Susceptibilidad 2022

La distribución espacial de la susceptibilidad a incendios en el área protegida Taita Imbabura se presenta en la Figura 35. La categoría muy baja (150.47 ha) se localiza en áreas planas y ligeramente onduladas, donde la propagación del fuego es limitada debido a la topografía suave y la presencia de cultivos y vegetación dispersa. La categoría baja (4,783.66 ha) se encuentra en terrenos montañosos, donde predominan el bosque y otras coberturas vegetales que ofrecen una resistencia moderada al avance del fuego, influenciado por las pendientes moderadas.

La categoría moderada con 2,357.89 ha, abarca zonas con pendientes más pronunciadas, facilitando la propagación del fuego, aunque la vegetación densa en algunas áreas podría ralentizar su avance. La categoría alta (3,043.32 ha), se distribuye en laderas escarpadas, donde las fuertes pendientes y la exposición al viento incrementan la vulnerabilidad a incendios, especialmente en áreas de páramo o pajonal. Finalmente, la categoría no aplica que cubre 42.39 ha, corresponde a terrenos con afloramientos rocosos o zonas donde no se puede determinar la susceptibilidad a incendios, según se evidencia en la Tabla 24.

Figura 35. Susceptibilidad a incendios forestales 2022

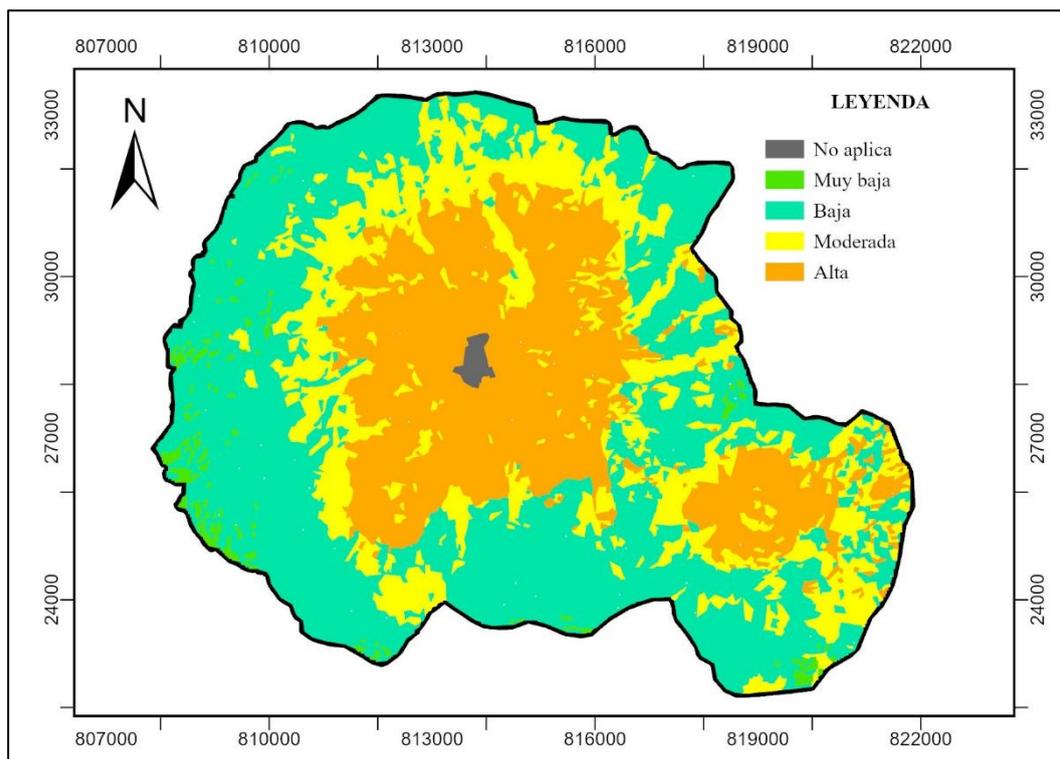


Tabla 24. Susceptibilidad 2022

	2022	
Susceptibilidad	Área (ha)	Porcentaje (%)
No aplica	42.39	0.41
Muy baja	150.47	1.45
Baja	4783.66	46.10
Moderada	2357.89	22.72
Alta	3043.32	29.33
Total	10377.73	100

3.5.9. Susceptibilidad 2023

La distribución de la susceptibilidad a incendios en el área analizada está influenciada por el relieve y las condiciones climáticas como muestra a Figura 35. La categoría muy baja (135.8 ha) se localiza en áreas planas y ligeramente onduladas, con pendientes suaves y dominadas por cultivos, lo que limita la propagación del fuego. La categoría baja (4209.91 ha) se encuentra en zonas montañosas, donde las pendientes moderadas y la vegetación variada ofrecen una resistencia parcial al fuego. La categoría moderada (3435.76 ha) abarca áreas muy montañosas, con



pendientes más pronunciadas, favoreciendo la propagación del fuego, aunque la vegetación densa puede retardar su avance. La categoría alta (2379.16 ha) predomina en zonas escarpadas y muy escarpadas, con fuertes pendientes y mayor exposición al viento, lo que incrementa la vulnerabilidad a incendios, especialmente en áreas de páramo o vegetación arbustiva.

La categoría no aplica (215.99 ha) corresponde a áreas de afloramientos rocosos sin vegetación, donde no se aplica el análisis de susceptibilidad a incendios. Las condiciones climáticas, como vientos entre 2.11 y 6.06 m/s y la orientación hacia el norte como predomina el área, favorecen la propagación del fuego, especialmente en áreas escarpadas como se evidencia en la Tabla 25.

Figura 36. *Susceptibilidad a incendios forestales 2023*

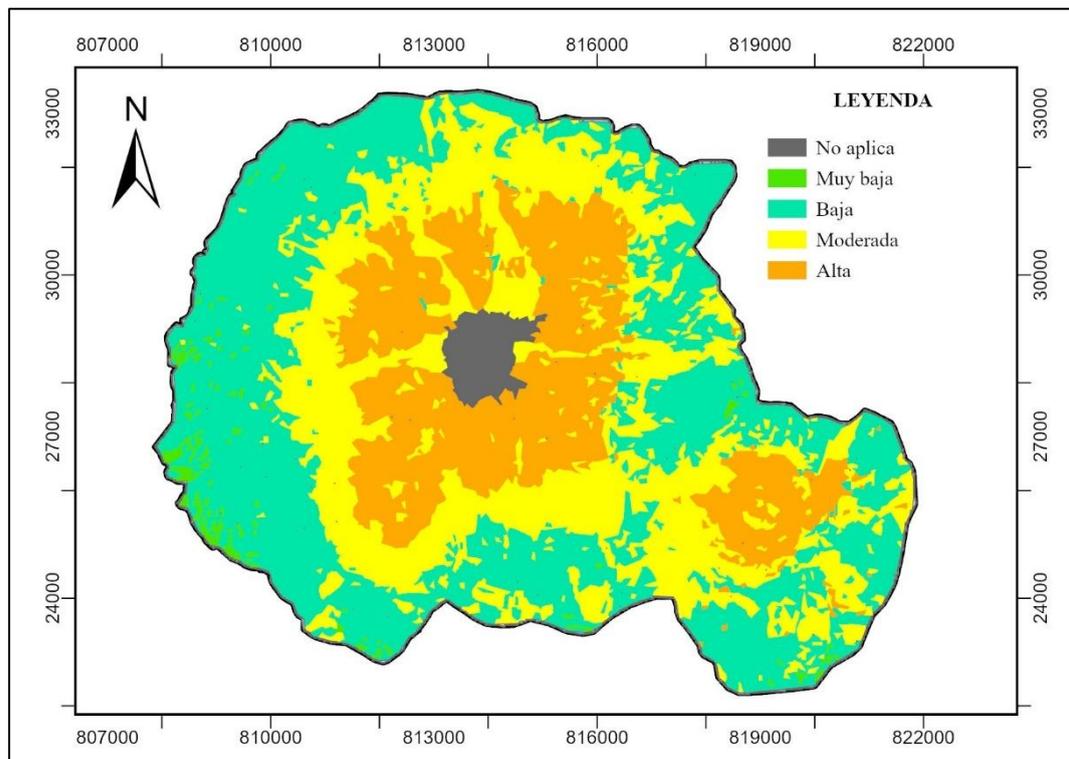




Tabla 25. Susceptibilidad 2023

2023		
Susceptibilidad	Área (ha)	Porcentaje (%)
No aplica	215.99	2.08
Muy baja	135.8	1.31
Baja	4209.91	40.57
Moderada	3435.76	33.11
Alta	2379.16	22.93
Total	10376.62	100

Entre 2014 y 2023, la susceptibilidad a incendios forestales en el área protegida Taita Imbabura presentó variaciones importantes, influenciadas por factores como la pendiente, las condiciones climáticas y el uso del suelo. Durante este período, las categorías de susceptibilidad baja y moderada fueron las más predominantes, con fluctuaciones en su distribución según los cambios en el entorno y las actividades humanas.

La categoría muy baja se concentró principalmente en zonas planas o ligeramente onduladas, donde las actividades agrícolas y pastoriles limitan la propagación del fuego. Aunque su cobertura experimentó una ligera reducción, se mantuvo como una zona de bajo riesgo relativamente estable.

La categoría baja ocupó una parte considerable del área, especialmente en sectores montañosos utilizados para la agricultura y el pastoreo. Si bien se mantuvo como una de las categorías más extensas, su superficie mostró leves cambios, sugiriendo una posible reducción de la vulnerabilidad en ciertas zonas debido a modificaciones en el uso del suelo y acciones de manejo.

La categoría moderada experimentó un aumento progresivo a lo largo del tiempo, reflejando la expansión de áreas montañosas o con vegetación más densa. Estas zonas, aunque pueden contener parcialmente el fuego, siguen siendo vulnerables debido a la inclinación del terreno y la acumulación de material combustible.

La categoría alta, correspondiente a las zonas más propensas a incendios por su topografía escarpada y la presencia de páramo, también presentó variaciones. Aunque su extensión disminuyó



ligeramente hacia el final del período analizado, estas áreas continúan siendo altamente vulnerables por las condiciones ambientales que favorecen la propagación del fuego.

El análisis multitemporal de la cobertura vegetal en la Reserva Ecológica El Ángel (REEA) y Arenillas, Bonilla y Taipe (2021) utilizando imágenes satelitales de Sentinel-2 y Landsat-8, muestra cambios importantes en la vegetación entre 2016 y 2017 para la REEA, con aumentos en el páramo herbáceo y de almohadillas, y disminuciones en el páramo arbustivo y de frailejones. En Arenillas (2015-2019), se observó una expansión del bosque arbustal y seco, mientras que áreas de suelo desnudo y zona urbana disminuyeron. Estos cambios reflejan el impacto de factores climáticos y humanos. En contraste con el análisis en el área protegida Taita Imbabura (2014-2023) mostró una predominancia de áreas de riesgo bajo y moderado para incendios forestales, con algunas zonas de riesgo alto, especialmente en áreas montañosas. Aunque se redujo la vulnerabilidad en algunas zonas, el cambio en el uso del suelo y las condiciones climáticas siguen influyendo en la propagación del fuego.

La comparación entre el análisis multitemporal realizado en el área protegida Taita Imbabura y el modelo AHP aplicado en el cantón Cotacachi (Arias et al., (2024) revela similitudes y diferencias clave en la susceptibilidad a incendios forestales. En ambos estudios, las áreas de alta susceptibilidad están asociadas con coberturas vegetales como bosques nativos y páramos, así como con factores topográficos y climáticos. En el área protegida Taita Imbabura, las zonas más vulnerables se concentran en áreas de relieve escarpado y vegetación densa, mientras que, en Cotacachi, el 51.41% del territorio presenta susceptibilidad alta y muy alta, especialmente en la zona subtropical, donde predominan los cultivos y bosques nativos. Una diferencia notable es la evolución temporal observada en Taita Imbabura, donde las categorías de susceptibilidad han mostrado cambios significativos entre 2014 y 2023, incluyendo una reducción en las áreas de alta vulnerabilidad, pasando de 3481.26 ha en 2014 a 2379.16 ha en 2023. En contraste, el modelo



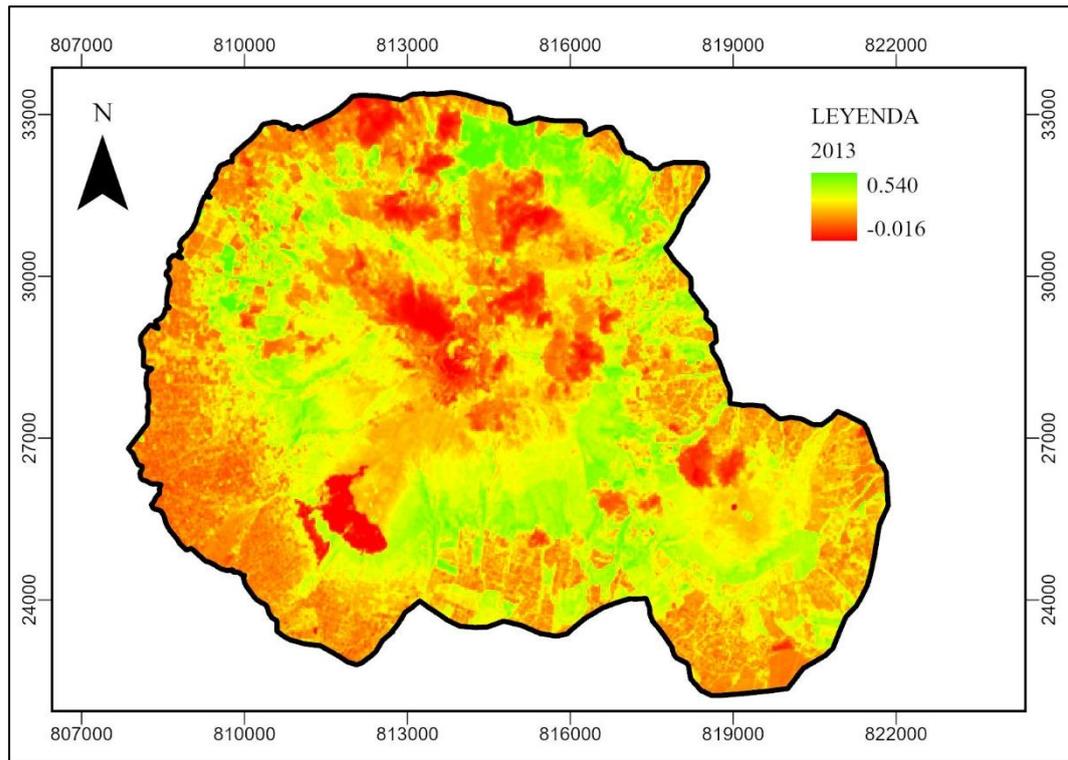
AHP en Cotacachi no aborda una perspectiva temporal, pero identifica variaciones espaciales marcadas entre las zonas andina y subtropical. Estas diferencias resaltan la importancia de considerar tanto la dimensión temporal como la espacial para comprender la dinámica de la susceptibilidad a incendios forestales en distintas regiones.

3.6. Evaluación de los patrones de cambio y recuperación de la vegetación en las áreas afectadas por incendios forestales

3.6.1. Índice de vegetación (NDVI)

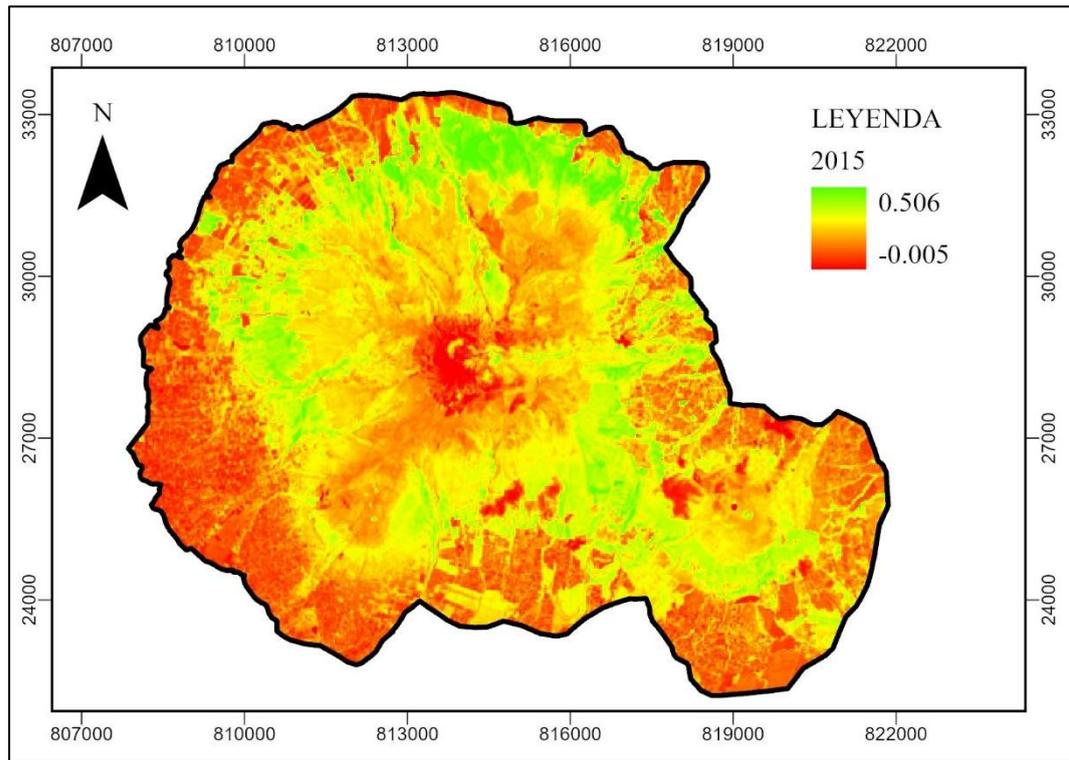
La distribución espacial y temporal del NDVI se indica en las Figuras 37 a 44. Los valores positivos más altos del NDVI se localizan en los píxeles de color verde en la imagen, que representa el vigor o verdor de la vegetación, destacándose el bosque nativo y el páramo donde la cobertura del suelo está constituida por árboles, arbustos y vegetación herbácea. Los valores intermedios del NDVI corresponden a los cultivos, mientras que los valores negativos más bajos representan las áreas incendiadas y los suelos sin cobertura vegetal.

Figura 37. NDVI 2013



En el área protegida Taita Imbabura en el año 2013 se determinó mediante el cálculo del NDVI que los sitios con valores bajos y negativos se distribuyen en toda la superficie. En este año el rango de valores del índice de vegetación varía entre -0.016 y 0.540.

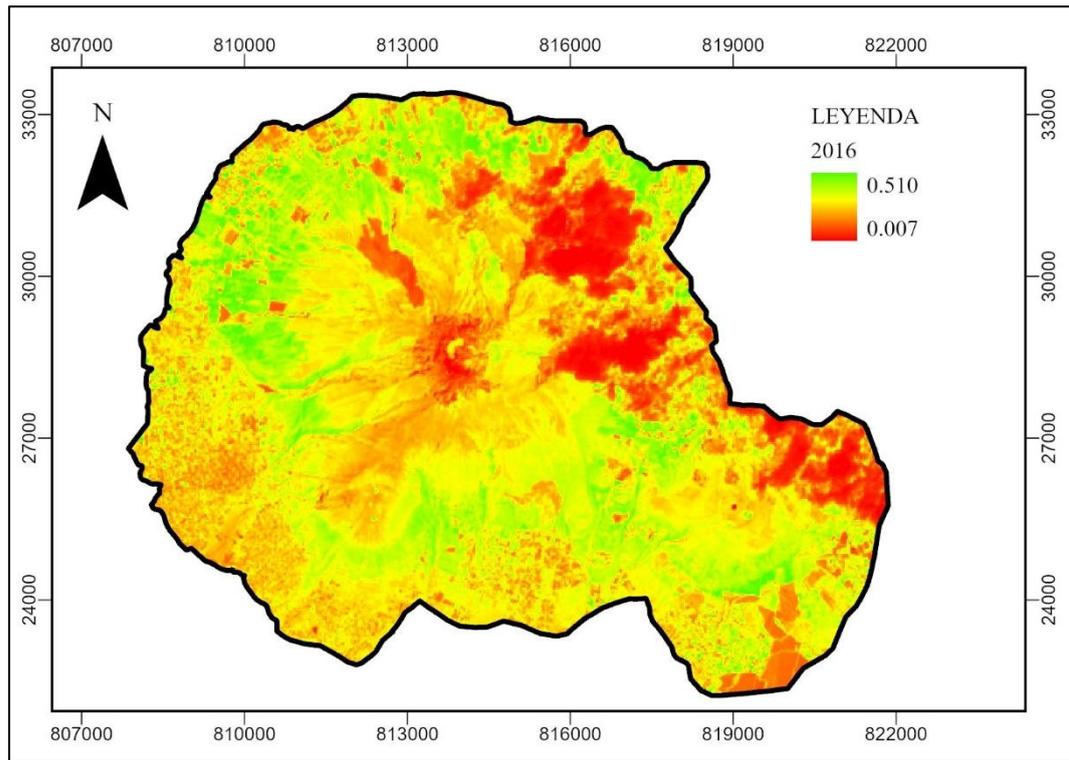
Figura 38. NDVI 2015



En el área protegida Taita Imbabura en el año 2015 se determinó mediante el cálculo del NDVI que los sitios con valores bajos y negativos se distribuyen en toda la superficie. En este año el rango de valores del índice de vegetación varía entre -0.005 y 0.506.



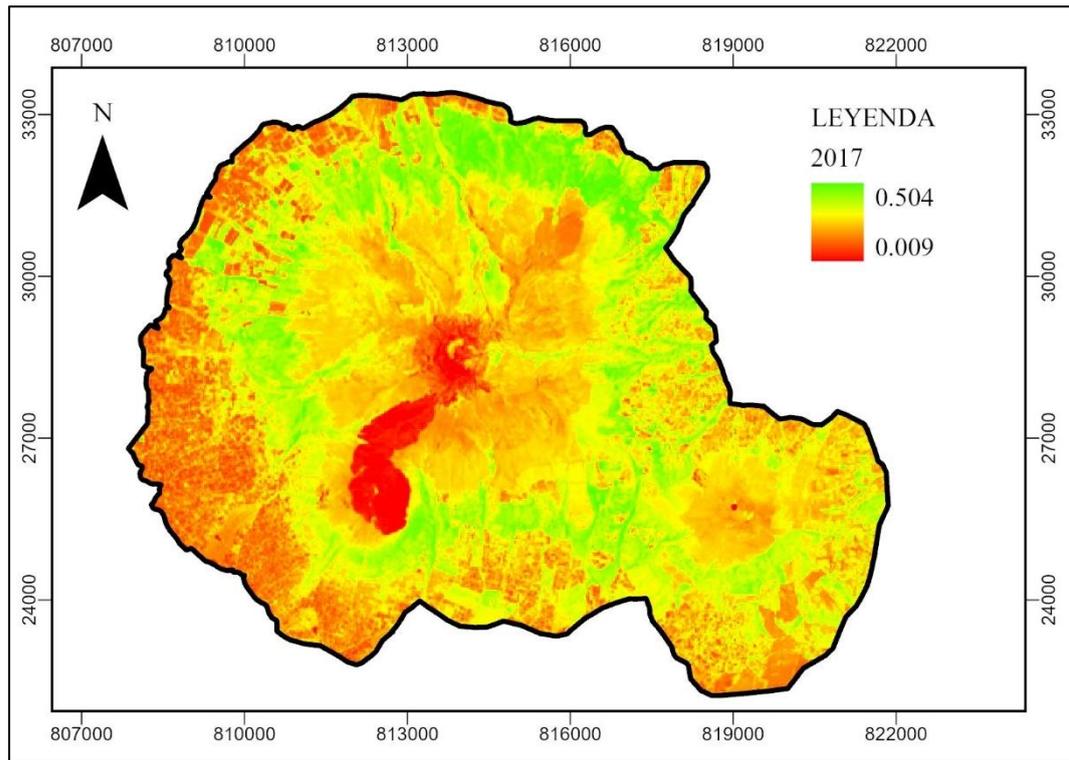
Figura 39. NDVI 2016



En el área protegida Taita Imbabura en el año 2016 se determinó mediante el cálculo del NDVI que los sitios con valores bajos y negativos se distribuyen en toda la superficie. En este año el rango de valores del índice de vegetación varía entre 0.007 y 0.510.



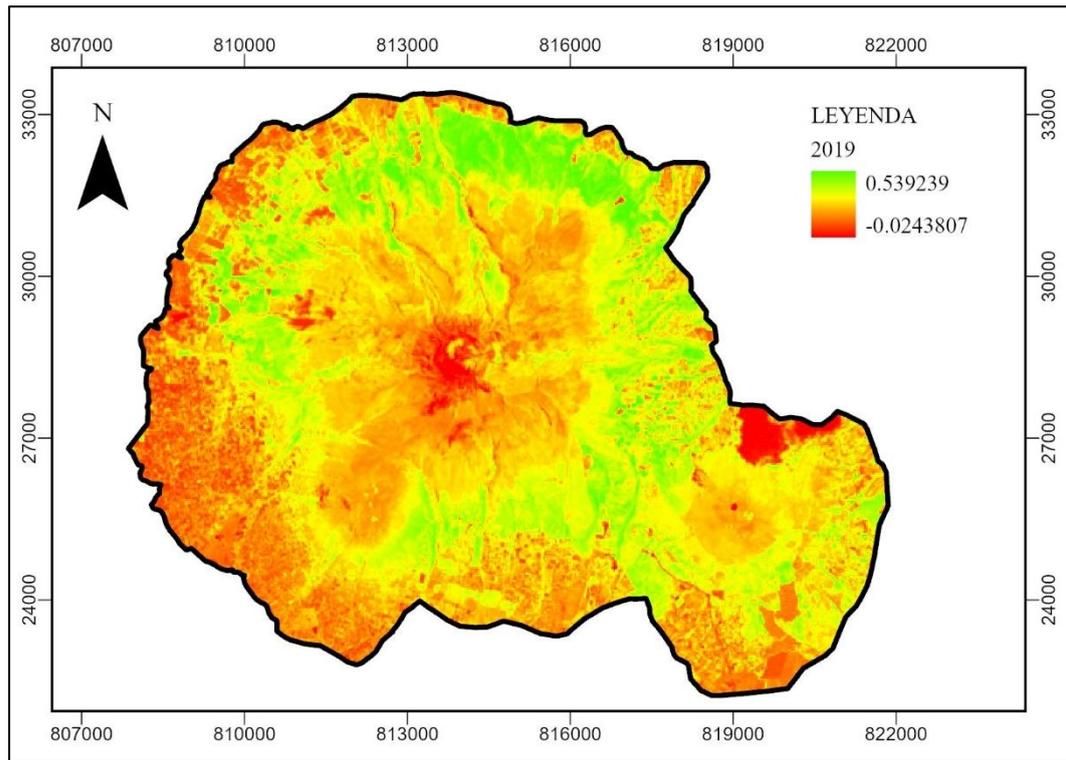
Figura 40. NDVI 2017



En el área protegida Taita Imbabura en el año 2017 se determinó mediante el cálculo del NDVI que los sitios con valores bajos y negativos se distribuyen en toda la superficie. En este año el rango de valores del índice de vegetación varía entre 0.009 y 0.504.



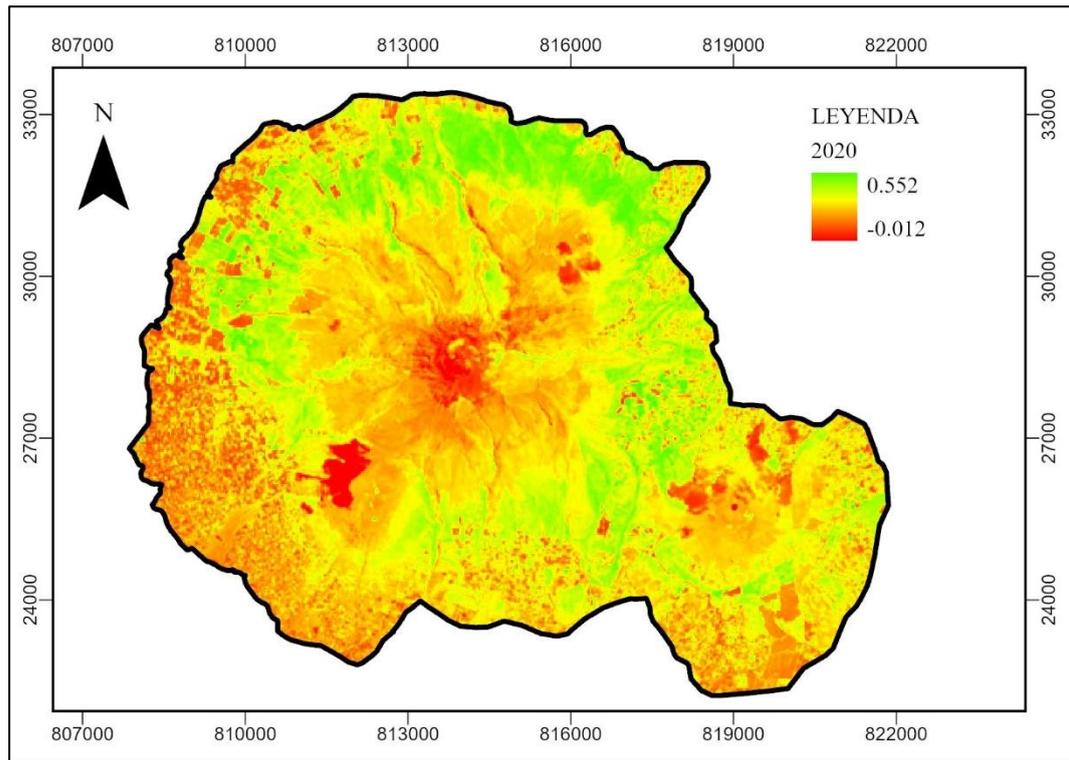
Figura 41. NDVI 2019



En el área protegida Taita Imbabura en el año 2019 se determinó mediante el cálculo del NDVI que los sitios con valores bajos y negativos se distribuyen en toda la superficie. En este año el rango de valores del índice de vegetación varía entre -0.024 y 0.539.



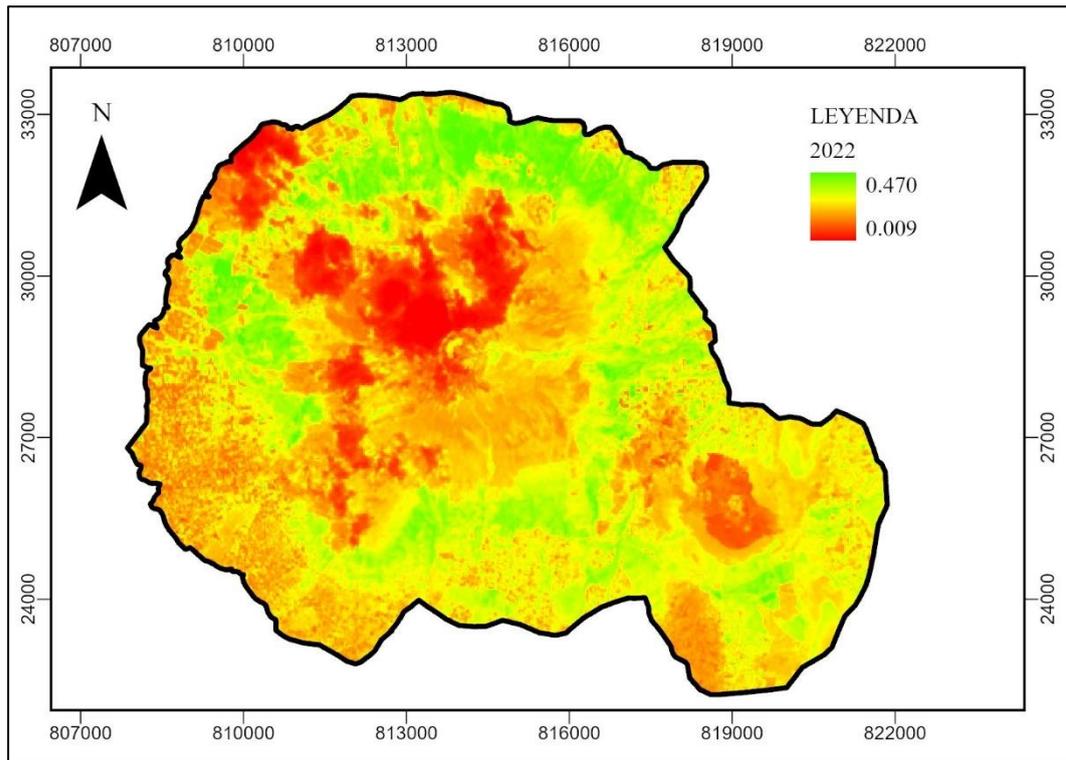
Figura 42. NDVI 2020



En el área protegida Taita Imbabura en el año 2020 se determinó mediante el cálculo del NDVI que los sitios con valores bajos y negativos se distribuyen en toda la superficie. En este año el rango de valores del índice de vegetación varía entre -0.012 y 0.552.

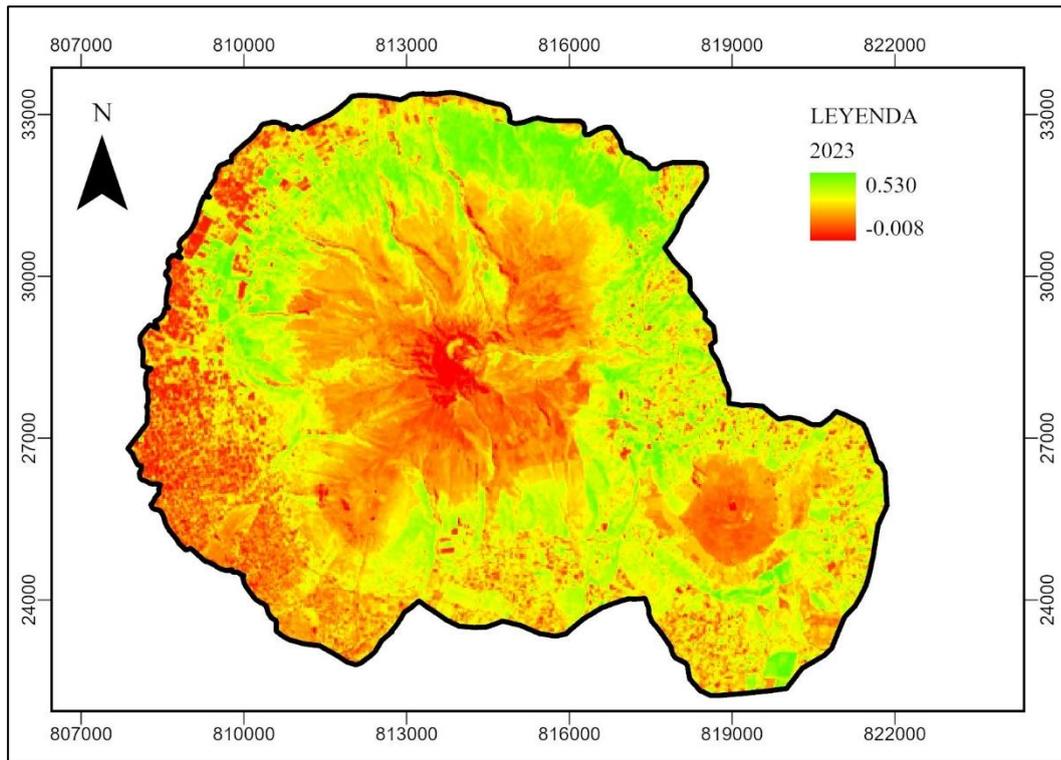


Figura 43. NDVI 2022



En el área protegida Taita Imbabura en el año 2022 se determinó mediante el cálculo del NDVI que los sitios con valores bajos y negativos se distribuyen en toda la superficie. En este año el rango de valores del índice de vegetación varía entre 0.009 y 0.470.

Figura 44. NDVI 2023



En el área protegida Taita Imbabura en el año 2023 se determinó mediante el cálculo del NDVI que los sitios con valores bajos y negativos se distribuyen en toda la superficie. En este año el rango de valores del índice de vegetación varía entre -0.008 y 0.530.

3.6.2. Evaluación de patrones de cambio

Los valores máximos de NDVI indican una estabilidad en la cobertura de áreas densamente vegetadas, como el bosque nativo y el páramo, con ligeros incrementos en algunos años como en el caso del 2020 con valor de 0.552. Los valores de índice superiores a 0 reflejan distintos niveles de desarrollo de la vegetación; a medida que la vegetación es más vigorosa, el valor se aproxima a 1, es decir cuando el índice supera el rango de 0.3 a 0.4 se considera que la vegetación se encuentra en un estado de productividad fotosintética (Romero, 2016). Sin embargo, los valores mínimos de NDVI destacan patrones de deterioro en ciertas áreas, con registros negativos más bajos en años como 2019 (con valor de -0.024). Carbajal y Onofre (2020), los valores del índice



inferiores a 0.1 están asociados a áreas con afloramiento de roca, suelos arenosos o zonas de glaciar. Los índices con valores entre 0.2 y 0.3 representan suelos con baja productividad, caracterizados por la presencia de arbustos o pastizales naturales, en la Tabla 26 se indican los valores del NDVI desde el año 2013 hasta el año 2023.

Tabla 26. *Valores de NDVI máximo y mínimo por año*

Año	NDVI Máximo	NDVI Mínimo
2013	0.540	-0.016
2015	0.506	-0.005
2016	0.510	0.007
2017	0.504	0.009
2019	0.539	-0.024
2020	0.552	-0.012
2022	0.470	0.009
2023	0.530	-0.008

Los resultados del análisis multitemporal de NDVI en el área protegida Taita Imbabura evidencian una estabilidad relativa en las áreas de vegetación densa, como bosque nativo y páramo, lo que refleja la resiliencia de estos ecosistemas. Sin embargo, la presencia de valores negativos en ciertos periodos destaca la vulnerabilidad de áreas afectadas por disturbios, como incendios forestales.

Los resultados obtenidos en la presente investigación se alinean con estudios previos que evalúan el estado de conservación de ecosistemas similares, como el bosque de ceja andina suroccidental del Parque Nacional Sangay (Carbajal y Onofre, 2020). En ambos casos, los valores máximos de NDVI reflejan una cobertura vegetal densa y vigorosa, característica de ecosistemas bien conservados. En el área protegida Taita Imbabura, el NDVI máximo alcanzó un valor de 0.552 en 2020, lo que sugiere la persistencia de áreas con vegetación vigoroso y saludable. De manera similar, en el bosque de ceja andina, los valores máximos registrados en 2001 (0.795) y 2014 (0.812) destacan la densidad vegetal constante en el tiempo.



La variabilidad observada en los valores de NDVI puede explicarse en los dos estudios por factores meteorológicos y condiciones de suelo. En el Parque Nacional Sangay, la diferencia mínima entre los valores de 2001 y 2014 fue de 0.018 y 0.017 en valores mínimos y máximos respectivamente, lo que refleja la influencia de la precipitación, temperatura, radiación solar y otros factores meteorológicos. En el área de estudio, los valores mínimos más bajos, como los registrados en 2019 (-0.024), muestran áreas afectadas por disturbios, como incendios forestales, que alteran la cobertura vegetal y exponiendo al suelo.

El análisis de Maldonado, (2021) sobre la variación y respuesta de la vegetación a factores climáticos en la Reserva de la Biosfera Sierra La Laguna (RBSLL) en comparación con el área protegida Taita Imbabura indica patrones comunes y diferencias que reflejan las características propias de cada región.

En la RBSLL, los valores de NDVI durante la temporada de crecimiento (septiembre-noviembre) de 2001 a 2015 muestran un aumento constante en la productividad vegetal, con valores más altos en 2015 (0.65) y una correlación positiva significativa entre NDVI y factores climáticos, como la precipitación y la temperatura. Este patrón destaca cómo las condiciones climáticas influyen directamente en el vigor y la cobertura vegetal.

Además, en el área protegida Taita Imbabura, los valores máximos de NDVI reflejan estabilidad en áreas densamente vegetadas, como el bosque nativo y el páramo, con ligeros incrementos en ciertos años, como 2020 (0.552). Sin embargo, los valores mínimos negativos, como los registrados en 2019 (-0.024), evidencian áreas afectadas por disturbios, como incendios forestales, que causan pérdida de cobertura vegetal y deterioro ambiental.



3.7. Índice de incendio (NBR)

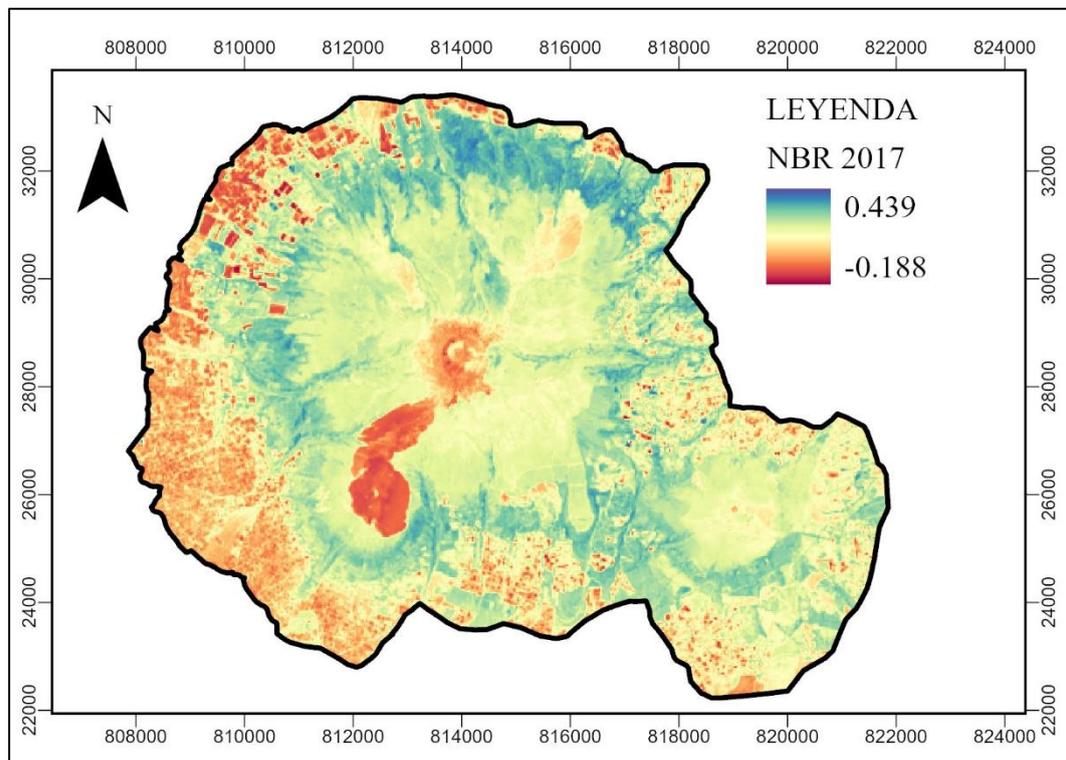
Entre los años analizados como se muestra en la Tabla 27, se observó que el NBR máximo, que representa las áreas con mayor cobertura vegetal saludable, resaltó en 2020 con un valor de 0.512, mientras que disminuyó en 2022 a 0.392. Por otro lado, el NBR mínimo, que refleja las áreas más afectadas por disturbios como incendios forestales, disminuyó en 2020 alcanzando su valor más bajo (-0.262), pero resaltó en 2022 con un incremento a -0.086.

Tabla 27. NBR 2017-2020-22

Año	NBR Máximo	NBR Mínimo
2017	0.439	-0.188
2020	0.512	-0.262
2022	0.392	-0.086

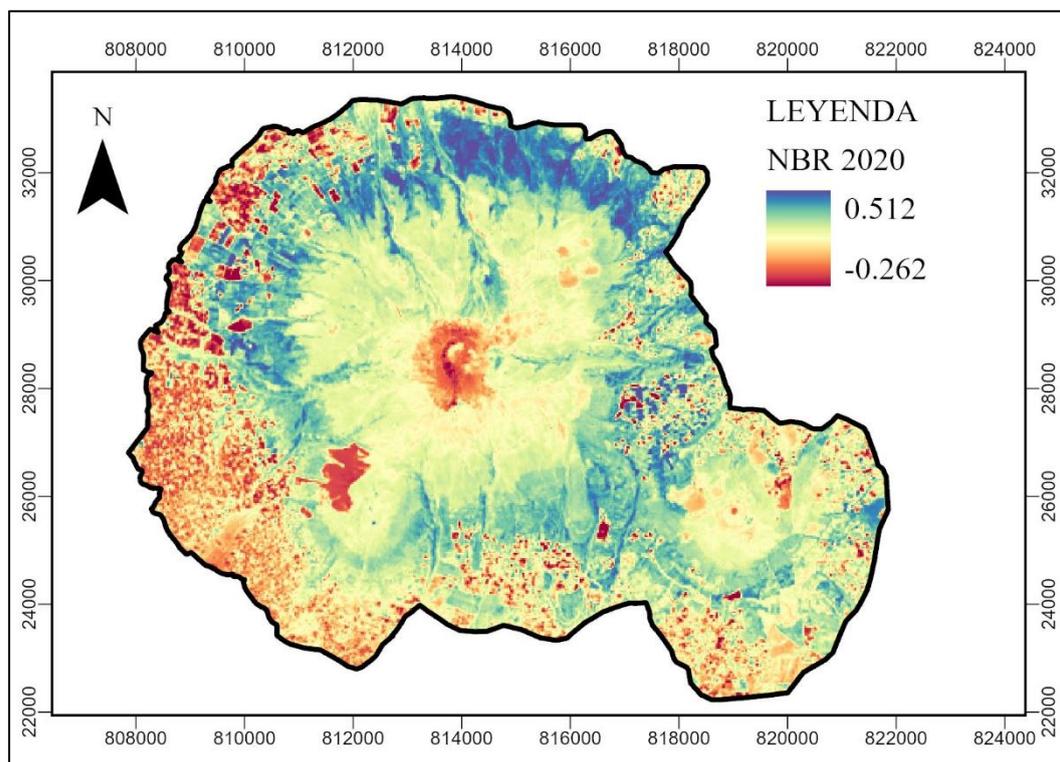
Se detectó ocurrencia de incendios en los años 2017, 2020 y 2023 como se muestra en las Figuras 45, 46 y 47.

Figura 45. Índice de incendio (NBR) 2017



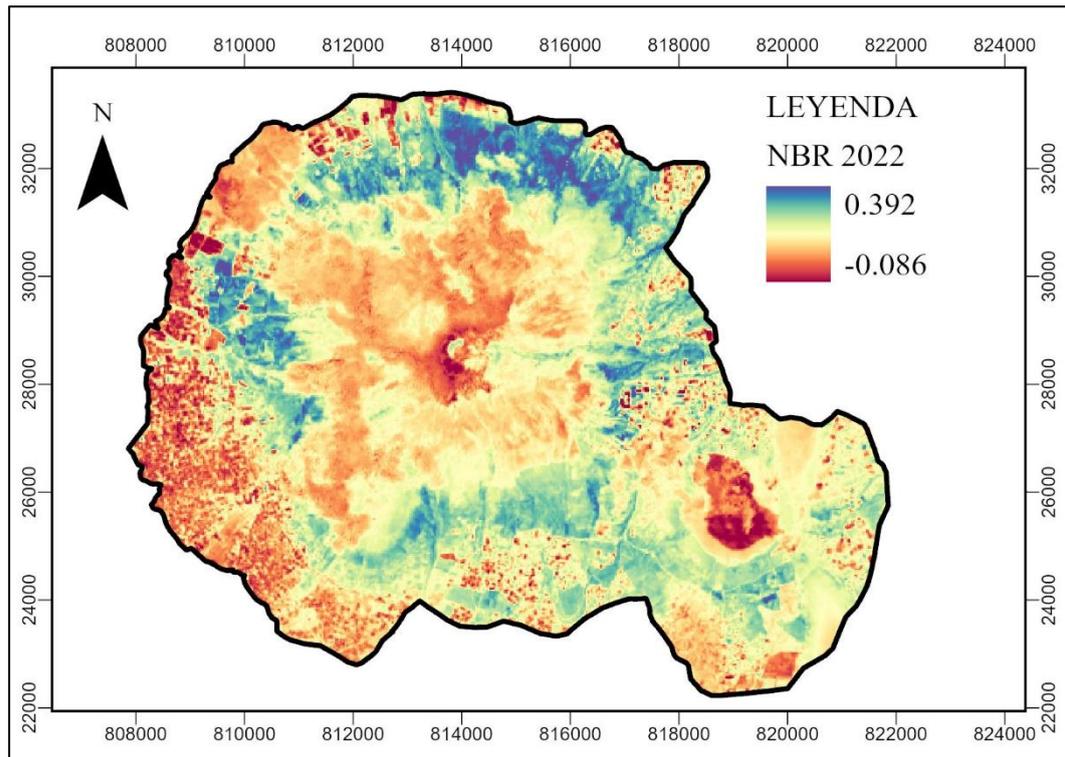
El análisis multitemporal permitió identificar las áreas afectadas por incendios forestales en el año 2017. Los incendios registrados se localizaron principalmente en las vertientes sur y noreste del volcán, donde predominaban ecosistemas de páramo y pajonal, evidenciando la susceptibilidad de estas zonas frente a eventos de incendios forestales.

Figura 46. Índice de incendio (NBR) 2020



El índice de incendios (NBR) permitió determinar la superficie de cobertura incendiada, en el año 2020 el incendio registrado se localizó en las vertientes sur del volcán, donde predominaba el páramo o pajonal.

Figura 47. Índice de incendio (NBR) 2022



El análisis permitió identificar el área afectada por incendios forestales en el año 2022. Este incendio se ubicó en las vertientes sureste del volcán, afectando principalmente zonas caracterizadas por cobertura de pajonal y páramo, lo que resalta nuevamente la vulnerabilidad de este tipo de ecosistemas frente a eventos de origen antrópico o natural.

3.7.1. Recuperación de la vegetación

Se detectó una recuperación en los patrones de vegetación en los años 2017, 2020 y 2022, a través del índice NBR, como se muestra en las Figuras 48, 49 y 50. Los mapas indican cómo las áreas quemadas durante los incendios muestran signos de regeneración en los períodos posteriores, con una mejora gradual en la cobertura vegetal, especialmente en las zonas afectadas en 2017.

El patrón de cambio muestra que, aunque la superficie quemada en 2017 fue la mayor con 339.89 hectáreas, la disminución en la extensión de incendios en 2020 fue de 58.08 hectáreas, que indica una posible recuperación de la vegetación. En 2022 debido al porcentaje de nubosidad se usó la

imagen satelital del 2023 para observar las has quemadas del 2022, la superficie quemada aumentó a 159.03 hectáreas, lo que sugiere que algunas áreas afectadas anteriormente han comenzado a regenerarse, pero aún existen zonas vulnerables. Este patrón refleja una recuperación gradual de la vegetación en las áreas previamente quemadas, aunque de manera desigual dependiendo de la intensidad de los incendios como se evidencia en la Tabla 28.

Figura 48. Recuperación del 2017 entre 2019

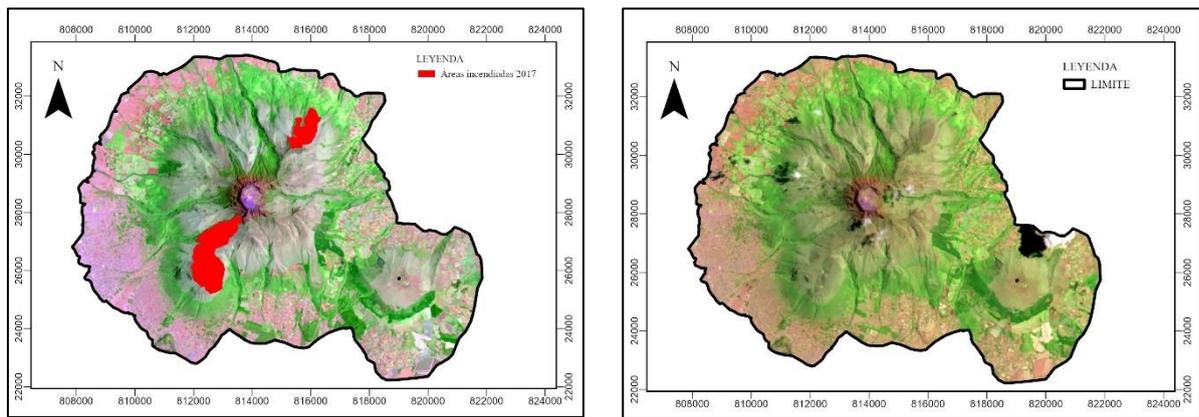


Figura 49. Recuperación del NBR 2020 entre 2023

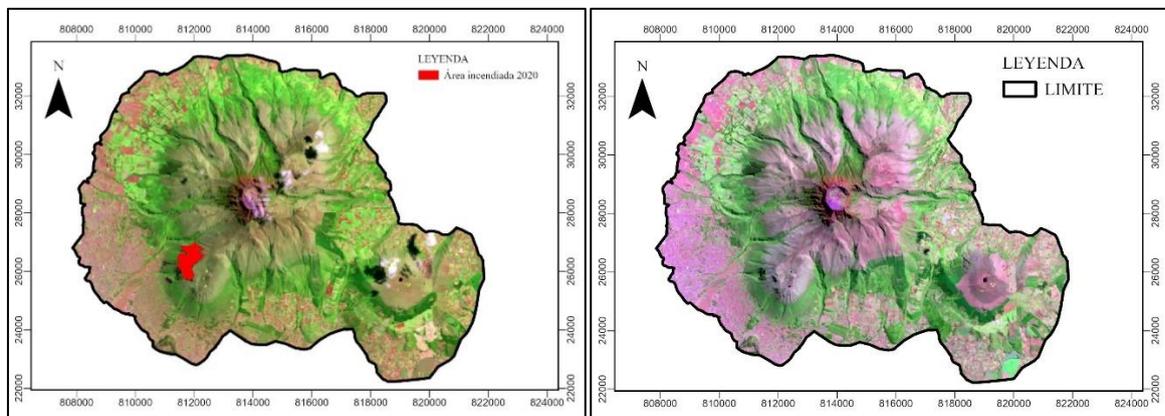




Figura 50. Recuperación del NBR 2022 entre 2023

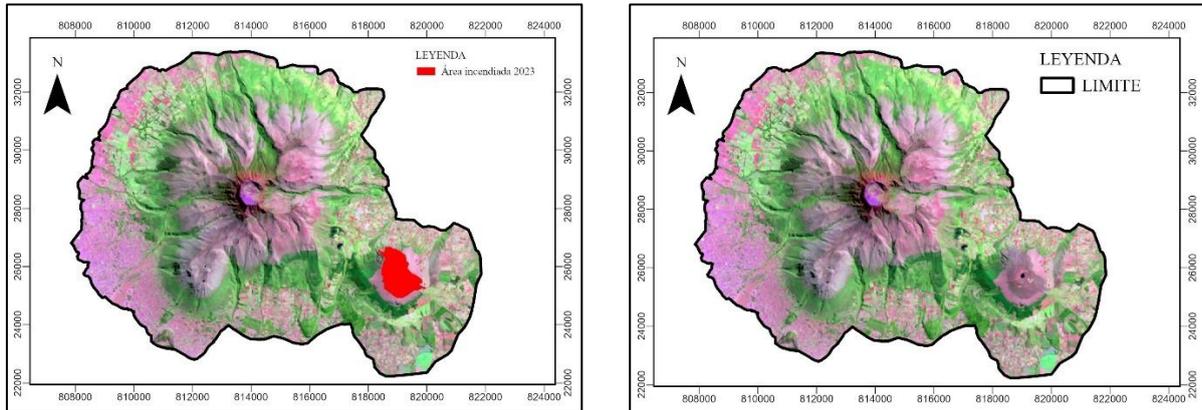


Tabla 28. Recuperación de vegetación

SUPERFICIES INCENDIADAS	
Año	Área (ha)
2017	339.89
2020	58.08
2022	159.03
Total	557

Entre 2017 y 2023, se observó una mejora en la recuperación de la vegetación, con una clara reducción en la superficie afectada por incendios. En el periodo 2020-2023, la recuperación continuó, aunque con un leve repunte en los incendios de 2023. Comparando la variación en el 2023, se identificaron la cicatriz del incendio sucedido en el 2022, lo que sugiere que la regeneración de la vegetación alcanzó una estabilización, aunque algunas áreas siguen siendo vulnerables a posteriores incendios.

La recuperación de la vegetación en el área protegida Taita Imbabura y el modelo de vulnerabilidad ante incendios en el Área de Conservación Guanacaste (ACG) de Vargas y Campos (2018) muestran dinámicas complementarias. En Taita Imbabura, se observa una regeneración gradual y desigual tras los incendios de 2017, 2020 y 2023, destacando la influencia de la intensidad del fuego y las condiciones locales. Por su parte, el modelo del ACG resalta que las áreas menos afectadas por incendios son más vulnerables debido a su alta biodiversidad y menor adaptación al



fuego, mientras que las zonas frecuentemente quemadas presentan mayor resiliencia. Los dos estudios coinciden en que los ecosistemas con alta biodiversidad son más vulnerables, aunque en el ACG se enfatiza el impacto de actividades humanas como el turismo y la investigación, un factor menos considerado en Taita Imbabura. La combinación de análisis multitemporales y modelos de vulnerabilidad podría ofrecer enfoques más integrales para la gestión de áreas protegidas frente a incendios forestales.

El área protegida Taita Imbabura comparado con la vulnerabilidad social ante incendios forestales en Granma, Cuba et al., (899) reflejan perspectivas complementarias sobre el impacto y manejo de incendios forestales. En Taita Imbabura, el análisis multitemporal del índice NBR muestra una regeneración gradual de la vegetación en áreas afectadas por incendios, con diferencias según la intensidad y frecuencia de los eventos. En contraste, el estudio de Granma pone énfasis en las dimensiones sociales, destacando que las poblaciones cercanas a áreas vulnerables, especialmente en la interfaz urbano-rural, enfrentan mayor exposición y riesgos asociados al impacto de los incendios. Lo cual evidencian que las estrategias de manejo de incendios deben integrar componentes ecológicos y sociales. Mientras que en Taita Imbabura la atención se centra en la recuperación del ecosistema, en Granma la percepción social y las condiciones socioeconómicas juegan un rol crucial en la prevención y mitigación de riesgos. Esta comparación sugiere que una gestión integral debe considerar tanto las dinámicas de regeneración vegetal como las necesidades y vulnerabilidades humanas, fortaleciendo la capacidad de respuesta comunitaria y promoviendo prácticas de manejo sostenible.

3.8. Validación de la clasificación supervisada

Las 7 clases de uso y cobertura del suelo obtenidas mediante la clasificación supervisada de imágenes del año 2023 fueron evaluadas mediante la matriz de confusión que se indica en la Tabla 29.



Tabla 29. Matriz de confusión

	Afloramiento de roca	Bosque Nativo	Mosaico agrícola	Mosaico pecuario	Plantaciones forestales	Páramo	Áreas incendiadas	Clasificación general	Precisión del usuario
Afloramiento de roca	2	2	0	0	0	0	0	4	50%
Bosque Nativo	0	19	0	0	5	0	0	24	79.17%
Mosaico agrícola	0	1	22	2	0	0	0	25	88%
Mosaico pecuario	0	2	2	13	0	1	0	18	72.22%
Plantaciones forestales	0	1	1	0	8	0	0	10	80%
Páramo	0	0	0	0	0	16	0	16	100%
Áreas incendiadas	0	0	0	0	0	0	3	3	100%
La verdad en general	2	25	25	15	13	17	3	100	
Precisión del productor (Recordatorio)	100%	76%	88%	86.67%	61.54%	94.12%	100%		
Precisión general (OA):	83%								
Índice Kappa:	0.79								



En índice Kappa obtenido fue de 0.79 con una precisión general del 83%, el valor del índice de acuerdo con la Tabla 30 tiene una fuerza de concordancia considerable, por lo que la clasificación supervisada de imágenes está correctamente realizada.

Tabla 30. Valoración del coeficiente Kappa

Coeficiente Kappa	Fuerza de la concordancia
0.00	Pobre
0.01 - 0.20	Leve
0.21 - 0.40	Aceptable
0.41 - 0.60	Moderada
0.61 - 0.80	Considerable
0.81 - 1.00	Casi perfecta

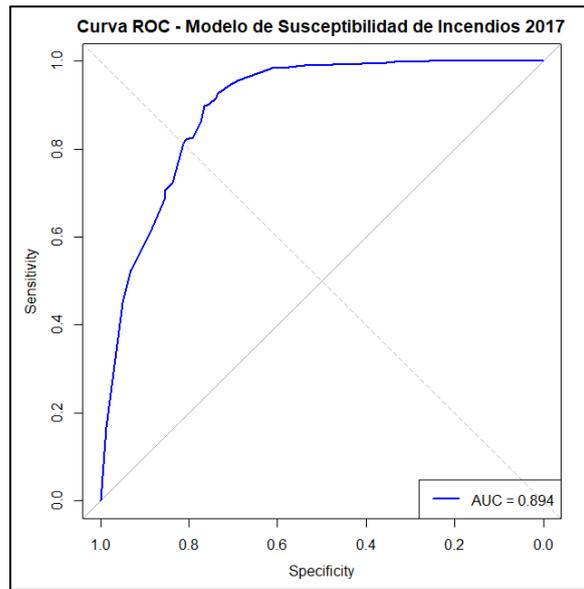
Fuente: Landis y Koch (1977)

3.9. Curva ROC

Los resultados obtenidos de AUC reflejan un buen desempeño del modelo ya que según Pérez M. (2022) menciona los valores cercanos a 1 indican excelente precisión, mientras que valores próximos a 0.5 reflejan una capacidad nula de predicción. Según la clasificación estándar, un AUC entre 0.75 y 0.9 representa un modelo con buen rendimiento.

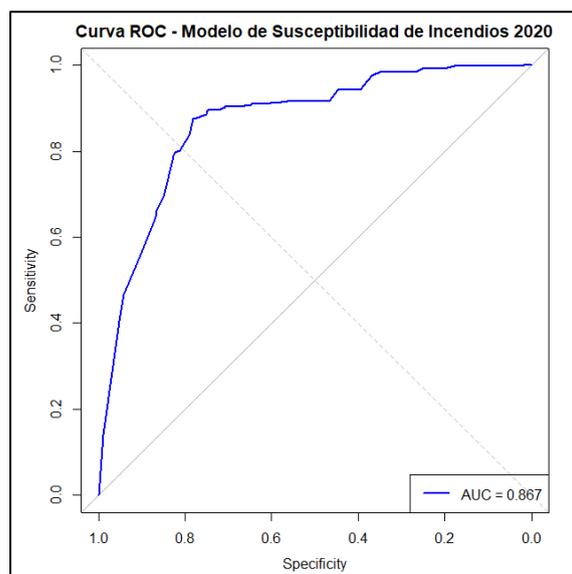
El valor de AUC 0.894 representa un nivel excelente de precisión del modelo para diferenciar entre zonas susceptibles y no susceptibles a incendios. Esto indica que el modelo de 2017 logró una alta capacidad de discriminación, minimizando errores de predicción como muestra la Figura 51.

Figura 51. Curva ROC 2017



En 2020, como se observa en la Figura 52 el modelo presenta un AUC 0.867, lo cual sigue siendo un resultado muy aceptable y representa un buen rendimiento. Sin embargo, muestra una ligera caída en comparación con 2017, lo que podría deberse a variaciones en las condiciones ambientales, calidad de los datos o cambios en el enfoque metodológico.

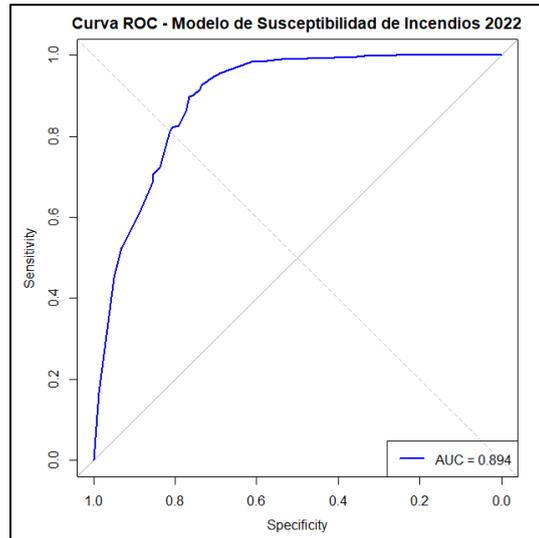
Figura 52. Curva ROC 2020





El modelo de 2022 recupera el nivel de precisión con un AUC 0.894, igualando al de 2017. Esto refleja una excelente capacidad predictiva, posiblemente gracias a una mejora en la calidad de datos, actualización de variables o perfeccionamiento en la metodología como indica la Figura 53.

Figura 53. Curva ROC 2022





CAPÍTULO IV

Conclusiones y recomendaciones

4.1. Conclusiones

- Los sitios con mayor susceptibilidad a incendios forestales en el área protegida Taita Imbabura son el páramo y el bosque nativo, con predominancia de ocurrencia de incendios en el año 2017, donde se perdió 339.89 hectáreas de cobertura vegetal. Se evidencia significativamente el cambio multitemporal de la vegetación en el periodo 2013-2023, predominando las categorías de mosaico pecuario y mosaico agrícola.
- Las áreas de cobertura vegetal del área protegida Taita Imbabura afectadas por incendios forestales, recuperaron casi la totalidad de su vigor después de los incendios registrados. En 2020, se registró el valor máximo de NDVI (0.552), evidenciando una recuperación significativa del vigor vegetal. El valor mínimo de NBR (-0.262) en 2020 indica la mayor afectación por incendios forestales en comparación con 2017 y 2022.
- El análisis multitemporal realizado en el área protegida Taita Imbabura evidenció que las áreas más afectadas por los incendios forestales fueron el páramo y el bosque, lo que resalta su vulnerabilidad ante estos eventos debido a la combustibilidad de la vegetación.



4.2. Recomendaciones

- Es prioritario compartir los hallazgos de este estudio con las comunidades locales y las autoridades de los GAD municipales que gestionan el área protegida Taita Imbabura. Esto facilitará la adopción de medidas preventivas y la reducción de los efectos ocasionados por los incendios forestales, promoviendo una gestión participativa.
- Implementación de campañas de educación ambiental para la población local, resaltando la importancia del área protegida Taita Imbabura como fuente de servicios ecosistémicos, especialmente de agua. Estas campañas deben fomentar la corresponsabilidad en la conservación de este ecosistema frente a amenazas como el cambio climático y los incendios.
- Instalación de franjas cortafuegos y torres de observación de incendios en las zonas más vulnerables. Estas medidas contribuirán a prevenir incendios forestales y a salvaguardar la biodiversidad del área protegida.
- Es esencial realizar evaluaciones periódicas mediante imágenes satelitales y tecnologías de teledetección, actualizando los datos cartográficos de susceptibilidad a incendios para garantizar decisiones informadas y oportunas en la gestión territorial.
- La metodología utilizada en este estudio ha demostrado su funcionalidad y precisión, por lo que se recomienda replicarla en otras áreas con problemas recurrentes de incendios forestales, adaptándola a sus características específicas para generar soluciones efectivas.



Referencias Bibliográficas

- Arias Muñoz, P., Chuma Pomasqui, L., Coronado Cacuango, P., & Jácome Aguirre, G. (2024). *Susceptibility to vegetation cover fires*. Obtenido de <https://publicaciones.unirioja.es/ojs/index.php/cig/article/view/5867>
- Kurbanov, E., Vorobev, O., Lezhnin, S., Sha, i., Wang, J., Li, X., . . . Wang, Y. (21 de Septiembre de 2022). *Remote Sensing of Forest Burnt Area, Burn Severity, and Post-Fire Recovery: A Review*. Obtenido de <https://www.mdpi.com/2072-4292/14/19/4714>
- Acosta, C. L. (8 de Abril de 2021). *CHARLA 005-2020 Hablemos Del Triangulo Del Fuego y Como Prevenir Incendios*. Obtenido de <https://es.scribd.com/presentation/502104969/CHARLA-005-2020-Hablemos-Del-Triangulo-Del-Fuego-y-Como-Prevenir-Incendios>
- Angulo Valencia, E. (2019). *ANÁLISIS DE ZONAS SUSCEPTIBLES A INCENDIOS DE COBERTURA VEGETAL DE LA RESERVA ECOLÓGICA “EL ÁNGEL”, PROVINCIA DEL CARCHI*. Obtenido de <https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/9813>
- Arias Muñoz, D., Chuma Pomasqui, L., Coronado Cacuango, P., & Jácome Aguirre, G. (2024). *Susceptibilidad para incendios de cubierta vegetal: una evaluación desde los métodos multicriterio y radiofrecuencia (Cantón Cotacachi, Ecuador)*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/379063749_Susceptibilidad_para_incendios_de_cubierta_vegetal_una_evaluacion_desde_los_metodos_multicriterio_y_radiofrecuencia_Canton_Cotacachi_Ecuador
- BCN. (24 de Abril de 2017). *Impacto de los incendios forestales en suelo, agua, vegetación y fauna*. Obtenido de <https://www.camara.cl/verDoc.aspx?prmTIPO=DOCUMENTOCOMUNICACIONCUE NTA&prmID=39186>
- Bonilla, D., & Taipe, J. (2021). *ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LA COBERTURA VEGETAL A PARTIR DE LA IMAGEN SATELITAL SENTINEL-2 Y LANDSAT-8 MEDIANTE EL USO DE ALGORITMOS DE CLASIFICACIÓN, EN LA RESERVA ECOLÓGICA EL ÁNGEL Y RESERVA ECOLÓGICA ARENILLAS*. Obtenido de <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/20884>
- Buchadas, A., Jung, M., Bustamante, M., Fernández Llamazares, Á., Garnett, S., Nanni, A., . . . Kuemmerle, T. (26 de Junio de 2023). *Tropical dry woodland loss occurs disproportionately in areas of highest conservation value*. Obtenido de <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/gcb.16832>
- Burbano Cepeda, N., & Rivera Rivera, J. (2022). *ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE ÁREAS DE COBERTURA VEGETAL INCENDIADAS EN EL CANTÓN IBARRA*. Obtenido de <https://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/12457/2/03%20RNR%20413%20TR ABAJO%20DE%20GRADO.pdf>
- Caccamo, G., Bradstock, R., Collins, L., Penman, T., & Watson, P. (24 de Noviembre de 2014). *Using MODIS data to analyse post-fire vegetation recovery in Australian eucalypt forests*. Obtenido de <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/14498596.2015.974227>
- Carbajal Morán, H., & Onofre Enriquez, F. (2020). *Determinación con imágenes satelitales del índice de vegetación de diferencia normalizada del valle de Pampas-Tayacaja*. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/7659358.pdf>
- Cariasco, M. (2014). *Concepto de Vegetación*. Obtenido de <https://es.scribd.com/doc/209351935/CONCEPTO-DE-VEGETACION>



- Cassidy, L., Perkins, J., & Bradley. (22 de Febrero de 2022). *Too much, too late: fires and reactive wildfire management in northern Botswana's forests and woodland savannas*. Obtenido de <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.2989/10220119.2022.2033833>
- Castillo, J. (28 de Mayo de 2017). *Teledetección para el análisis de incendios forestales*. Obtenido de <https://www.gisandbeers.com/teledeteccion-para-el-analisis-de-incendios-forestales/>
- Castro Miranda, W., Acevedo Barrios, R., Guerrero, M., Guzmán, K., & Gorostizaga, S. (14 de septiembre de 2022). *Assessing Forest Cover Loss Using Landsat Images and GIS: A Case Study in Colombian Protected Area*. Obtenido de <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10549811.2022.2123356>
- CDF. (2013). *MANUAL DE EXTINCIÓN DE INCENDIOS FORESTALES*. Obtenido de https://pfcyl.es/sites/default/files/biblioteca/documentos/manual_de_extincion_de_incendios_forestales_para_cuadrillas.pdf
- Chen, X., Volgelmann, J., Rollins, M., Ohlen, D., Key, C., & Yang, L. (09 de Agosto de 2011). *Detecting post-fire burn severity and vegetation recovery using multitemporal remote sensing spectral indices and field-collected composite burn index data in a ponderosa pine forest*. Obtenido de <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/01431161.2010.524678>
- Chuma Pomasqui, L., & Coronado Cacuango, P. (2022). *Zonificación de cobertura vegetal propensa a incendios en el cantón Cotacachi provincia de Imbabura*. Obtenido de <https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/12641>
- Cogollo, J. D. (2020). *Análisis de la susceptibilidad de la cobertura vegetal a incendios mediante Índice de Diferencia Normalizada de Humedad (NDMI) y clasificación del IDEAM: caso de estudio subregión Bajo Sinú – Córdoba*. Obtenido de <https://repositorio.unicordoba.edu.co/bitstreams/8c9a7377-db4a-4beb-a05d-29cd74222794/download>
- Collins, R., de Neufville, R., Claro, J., Oliveira, T., & Pacheco, A. (30 de Noviembre de 2013). *Forest fire management to avoid unintended consequences: A case study of Portugal using system dynamics*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301479713005562?via%3Dihub>
- CONAFOR. (2020). *PROGRAMA DE MANEJO DEL FUEGO*. Obtenido de <https://idefor.cnf.gob.mx/documents/1845/download>
- Cortez Andrade, G., & Rivera Guerrero, J. (2022). *DETERMINACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD A INCENDIOS DE COBERTURA VEGETAL EN LA ESTACIÓN BIOLÓGICA GUANDERA*. Obtenido de <http://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/13182/2/03%20RNR%20429%20TRA%20BAJO%20DE%20GRADO.pdf>
- Díaz Maigua, M., & Encarn, G. M. (2018). *ZONIFICACIÓN DE ÁREAS PROPENSAS A INCENDIOS DE COBERTURA VEGETAL EN EL CANTÓN PIMAMPIRO, PROVINCIA DE IMBABURA*. Obtenido de <https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/8655>
- Echandía Arbeláez, F. (2016). *Presión antrópica en la cuenca alta del Río Claro: cambios en uso y coberturas del suelo*. Obtenido de <https://repository.eia.edu.co/entities/publication/efa68975-a48d-4bfe-b836-ea093ac90211>
- Escobar, A. (2021). *Análisis de condiciones atmosféricas y de cobertura vegetal asociadas a incendios forestales*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/353244855_Analisis_de_condiciones_atmosfericas_y_de_cobertura_vegetal_asociadas_a_incendios_forestales



- Flórez Yepes, G., Rincon , A., Cardona, P., & Alzate, A. (Junio de 2017). *Análisis multitemporal de las coberturas vegetales en el área de influencia de las minas de oro ubicadas en la parte alta del sector de Maltería en Manizales, Colombia*. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/496/49650911012.pdf>
- Gobierno de España. (2020). *Riesgo antrópico*. Obtenido de <https://www.proteccioncivil.es/coordinacion/gestion-de-riesgo/otros/riesgo-anthropico>
- Gonzáles, F., Rodríguez , I., Chávez , L., & Gardón, D. (1899). *Vulnerabilidad social ante los impactos de los incendios forestales en Granma, Cuba del 2007 - 2017*. Obtenido de <https://cct-uleam.info/index.php/chone-ciencia-y-tecnologia/article/view/64/137>
- Ibáñez , A. (2011). *INCEPTISOLES* . Obtenido de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/12884/inceptisoles.pdf>
- IGAC. (2013). *Instituto Geográfico Agustín Codazzi* . Obtenido de https://cortolima.gov.co/sites/default/files/POMCAS/2020/POMCA_RIO_LUISA/3_6_PENDIENTES.pdf
- INAMHI. (2013). *Anuarios Meteorológicos*. Obtenido de <https://www.inamhi.gob.ec/biblioteca/>
- Instituto Geográfico Militar del Ecuador. (s.f.). *Geoportal*. Obtenido de <https://www.geoportaligm.gob.ec/portal/>
- Instituto Humboldt. (5 de Agosto de 2022). *Cómo el calentamiento global afecta los páramos*. Obtenido de <https://comunidadplanetaazul.com/como-el-calentamiento-global-afecta-los-paramos/>
- Jane Kapler, S. (2018). *Efecto del viento*. Obtenido de https://www.frames.gov/documents/fireworks/curriculum/Espanol/General/EducacionPrimaria/E06/E06_EfectoDelViento_ComoSePropaganLosIncendiosForestales.pdf
- Jiménez , A., Urrego , L., & Toro, L. (2016). *EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE INCENDIOS DE LA VEGETACIÓN EN EL NORTE DE ANTIOQUIA (COLOMBIA): ANÁLISIS DEL PAISAJE*. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/4239/423946648003.pdf>
- Landis, & Koch. (1977). *Evaluación de la concordancia inter-observador en investigación pediátrica: Coeficiente de Kappa*. Obtenido de https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0370-41062008000100008&script=sci_arttext
- Loor, A. C. (26 de Julio de 2022). *Evaluación de incendios forestales*. Obtenido de <https://storymaps.arcgis.com/stories/e6aea7809fa743e29eb4a940ec87a4bc>
- MAATE. (2013). *Geoportal*. Obtenido de <http://ide.ambiente.gob.ec/mapainteractivo/>
- Maldonado Enríquez, D. (2021). *VARIACIÓN Y RESPUESTA DE LA VEGETACIÓN A FACTORES CLIMÁTICOS EN LA REGIÓN DEL CABO CON ÉNFASIS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA SIERRA LA LAGUNA, BAJA CALIFORNIA SUR*. Obtenido de https://cibnor.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1001/2552/1/maldonado_d%20TESIS.pdf
- Martinez Fernández , J., & Martínez Vega, J. (2004). *El factor humano en los incendios forestales: Análisis de factores socio-económicos relacionados con la incidencia de incendios forestales en España*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/271193789_El_factor_humano_en_los_incendios_forestales_Analisis_de_factores_socio-economicos_relacionados_con_la_incidencia_de_incendios_forestales_en_Espana
- Mata, P. d. (2011). *CURSO BÁSICO DE ESPECIALIZACIÓN EN DEFENSA CONTRA INCENDIOS FORESTALES*. Obtenido de <https://pdfslide.es/documents/curso-bsico-de-especializacin-en-defensa-contra-curso-bsico-de-especializacin.html>



- Mejía Bastidas, A. (2021). *Análisis multitemporal de los cambios de la cobertura vegetal provocados por incendios forestales en San José de Minas, periodo 2012-2018*. Obtenido de <https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/11806>
- Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica. (2021). *TAITA IMBABURA – ÁREA PROTEGIDA EN ECUADOR*. Obtenido de <https://www.cancilleria.gob.ec/alemania/2021/09/09/taita-imbabura-area-prottegida-en-ecuador/>
- Miranda Castro, W., Acevedo Barrios, R., & Guerrero, M. (14 de Diciembre de 2022). *Monitoring Conservation of Forest in Protected Areas using Remote Sensing Change Detection Approach: a Review*. Obtenido de <https://link.springer.com/article/10.1134/S1995425522060154>
- Moore, P. (2001). *Los incendios forestales y la diversidad biológica*. Obtenido de <https://www.fao.org/4/y3582s/y3582s08.htm>
- Moraga Peralta, J. (2017). *Impacto de los incendios forestales en las*. Obtenido de <https://ocs.uazuay.edu.ec/index.php/memorias/article/download/91/85>
- Muñoz, J., Andrade Mesía, M., & González Osorio, B. (2016). *Cambio multitemporal de la cobertura vegetal y fragmentación en la reserva ecológica “Mache- Chindul” Ecuador*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/309754792_Cambio_Multitemporal_De_La_Cobertura_Vegetal_Y_Fragmentacion_En_La_Reserva_Ecologica_Mache-Chindul_Ecuador
- Nadia Valeria Urzúa Valenzuela, M. F. (2011). *Incendios forestales: principales consecuencias económicas y ambientales en Chile*. Obtenido de <https://riat.utralca.cl/index.php/test/article/view/108#:~:text=Los%20incendios%20forestales%20producen%20graves,atmosfera%20y%20desertificaci%C3%B3n%20entre%20otra.>
- Nantes, E. (2019). *EL MÉTODO ANALYTIC HIERARCHY PROCESS PARA LA TOMA*. Obtenido de <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/epio/article/download/26474/28219/78112>
- Nivelo, J. L. (2022). *Análisis de los procesos de cambio de uso y cobertura del suelo en la*. Obtenido de <https://repositorio.uasb.edu.ec/bitstream/10644/8687/1/T3801-MCCSD-Pabon-Analisis.pdf>
- Olivares, O., & López, M. (2019). *Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada aplicado al territorio indígena agrícola de Kashaama, Venezuela*. Obtenido de https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1659-42662019000200112
- Orrillo, H., Coronado, M., Rodríguez, C., & De Almeida Lobo, F. (30 de Diciembre de 2021). *Altitudinal gradient and its influence on the edofoclimatic characteristics of tropical forests*. Obtenido de <https://www.redalyc.org/journal/617/61770807018/html/>
- Pazmiño, D. (2019). Obtenido de Peligro de incendios forestales asociado a factores: https://www.researchgate.net/figure/Figura-5-Variabilidad-mensual-acumulada-del-Indice-de-Peligro-de-Incendios-Forestales_fig3_335845388
- Pazmiño, D. (2020). *DIFERENCIAS EN EL CLIMA QUE PRODUCE INCENDIOS FORESTALES Y DE OLAS DE CALOR EN VICTORIA, AUSTRALIA* *Climate*. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/8529783.pdf>
- Pérez, I. M. (2017). *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*. Obtenido de https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-40182017000100091&script=sci_arttext_plus&tlng=es



- Pérez, M. (2022). *La curva ROC*. Obtenido de <https://www.elsevier.es/es-revista-medicina-familia-semergen-40-articulo-la-curva-roc-S1138359322001952>
- Plana Bach, E., Font Bernet, M., & Serra Davos, M. (2016). *LOS INCENDIOS FORESTALES guía para comunicadores y periodistas*. Obtenido de https://efirecom.ctfc.cat/docs/efirecomperiodistes_es.pdf
- Ramos Rodríguez, M., García Castro, H., França Tetto, A., Batista, A., Manrique Toala, T., & Estévez Valdés, I. (2021). *Ocurrencia de incendios forestales en el cantón Santa Ana, provincia de Manabí, Ecuador (2012-2018)*. Obtenido de https://cfores.upr.edu.cu/index.php/cfores/article/download/687/html_1?inline=1
- Romero, M. (2016). *Evaluación del índice de vegetación de diferencia normalizada para determinar el estado de conservación del bosque de ceja andina sur occidental del Parque Nacional Sangay, parroquia Achupallas, cantón Alausí, provincia de Chimborazo*. Obtenido de <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/5138>
- Sánchez, M. A. (2015). *EL RÉGIMEN JURÍDICO DE LOS INCENDIOS FORESTALES*. Obtenido de https://www.google.com.ec/books/edition/El_r%C3%A9gimen_jur%C3%ADdico_de_lo_s_incendios_f/L8y0DQAAQBAJ?hl=es&gbpv=1
- Secretaría de Gestión de Riesgo. (Septiembre de 2023). *Incendios Forestales*. Obtenido de https://www.gestionderiesgos.gob.ec/wp-content/uploads/2023/09/SITREP_Nro._22_Incendios_Forestales_01012023_al_06092023.pdf
- Selmy, S., Kucher, D., Mozgeris, G., Moursy, A., Jimenez Ballesta, R., Kucher, O., . . . Rahman Mustafa, A. (27 de Noviembre de 2023). *Detecting, Analyzing, and Predicting Land Use/Land Cover (LULC) Changes in Arid Regions Using Landsat Images, CA-Markov Hybrid Model, and GIS Techniques*. Obtenido de <https://www.mdpi.com/2072-4292/15/23/5522>
- SGR. (2024). *Reportes de monitoreo de amenazas y eventos peligrosos 2022*. Obtenido de <https://www.gestionderiesgos.gob.ec/reportes-de-monitoreo-de-amenazas-y-eventos-peligrosos-2022/>
- Shin, N., Saitoh, T., Takeuchi, Y., Tomoaki, M., Aiba, M., Kurokawa, H., . . . Suzuki, R. (09 de Diciembre de 2022). *Review: Monitoring of land cover changes and plant phenology by remote-sensing in East Asia*. Obtenido de <https://esj-journals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/1440-1703.12371>
- SNI. (2017). *Sistema Nacional de Información*. Obtenido de <https://sni.gob.ec/>
- Sunar, & Özkan. (25 de Noviembre de 2010). *Forest fire analysis with remote sensing data*. Obtenido de <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01431160118510>
- Tantavilca, L. D. (2022). *Efecto de las quemadas agrícolas en la cantidad de los macroinvertebrados del suelo en el distrito de Aco, Concepción 2021*. Obtenido de https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/11367/2/IV_FIN_107_TE_Cotrina_Tantavilca_2022.pdf
- Torres Girardi, E. (2007). *Prevención de Riesgos en el Combate de Incendios Forestales*. Obtenido de <https://www.achs.cl/docs/librariesprovider2/empresa/centro-de-fichas/trabajadores/prevencion-de-riesgos-en-el-combate-de-incendios.pdf>
- Ulibarry, P. G. (2009). *Impacto de los incendios forestales en suelo, agua, vegetación y fauna*. Obtenido de <https://www.camara.cl/verDoc.aspx?prmTIPO=DOCUMENTOCOMUNICACIONCUE NTA&prmID=39186>



- United Nations. (2021). *Índice Normalizado de Área Quemada (NBR)*. Obtenido de [https://un-spider.org/es/node/10959#:~:text=El%20C3%ADndice%20Normalizado%20de%20C3%81rea,de%20onda%20corta%20\(SWIR\)](https://un-spider.org/es/node/10959#:~:text=El%20C3%ADndice%20Normalizado%20de%20C3%81rea,de%20onda%20corta%20(SWIR).).
- Valencia, E. D. (2019). *ANÁLISIS DE ZONAS SUSCEPTIBLES A INCENDIOS DE COBERTURA VEGETAL DE LA RESERVA ECOLÓGICA “EL ÁNGEL”, PROVINCIA DEL CARCHI*. Obtenido de <https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/9813>
- Vargas, D., & Campos, C. (2018). *Modelo de vulnerabilidad ante incendios forestales para el Área de Conservación Guanacaste, Costa Rica*. Obtenido de <https://www.redalyc.org/journal/5156/515657704024/html/>
- Vilchis, A. (2015). *Modelado espacial para peligro de incendios forestales con predicción diaria en la cuenca del río Balsas*. Obtenido de https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-31952015000700008&script=sci_arttext
- WordPress. (2016). *LOS INCENDIOS FORESTALES Y EL MEDIO FÍSICO. COMPORTAMIENTO DEL FUEGO*. Obtenido de <https://selvicultura.wordpress.com/wp-content/uploads/2010/11/manual-de-incendios-2c2aa-evaulacic3b3n-curso-2015-2016.pdf>
- Zhai, J., Ning, Z., Dahal, R., & Yang, S. (2023). *Susceptibilidad del uso de la tierra y las características topográficas a los incendios forestales en el oeste de Estados Unidos: implicaciones para la gestión del paisaje*. Obtenido de <https://www.mdpi.com/1999-4907/14/4/807>

Anexos

Registro fotográfico de las salidas de campo



Figura 1. *Bosque Nativo*



Figura 2. *Vista del volcán El Cubilche*



Figura 3. *Páramo y vegetación arbustiva*



Figura 4. *Señalética de acceso al volcán*



Figura 5. *Sendero en el páramo*



Figura 6. *Uso y cobertura del suelo*