

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE CHOTA

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA FORESTAL Y AMBIENTAL



LÍNEA DE INVESTIGACIÓN

Manejo y conservación de recursos naturales

Modelamiento predictivo de áreas propensas a incendios forestales y análisis de factores ambientales mediante los Sistemas de Información Geográfica en la provincia de Chota

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE

INGENIERO FORESTAL Y AMBIENTAL

AUTOR

Bach. Iván Fernández Alvarado

ASESOR

Dr. Jim Jairo Villena Velásquez

COASESOR

Ing. Eiler Llatas Mires

CHOTA – PERÚ

OCTUBRE, 2025

Una firma manuscrita en azul que parece decir "Eiler Llatas Mires" con "U.N." debajo.

Ing. Eiler Llatas Mires

Una firma manuscrita en azul que parece decir "Jim Jairo Villena Velásquez".

M. Sc. JIM J. VILLENA VELÁSQUEZ
DOCENTE – UNACH



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE CHOTA
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS



Unidad de Investigación de la Escuela Profesional de Ingeniería

Forestal y Ambiental

“Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana”

CONSTANCIA DE **ORIGINALIDAD**

El que suscribe, Director de la Unidad de Investigación de la Escuela Profesional de Ingeniería Forestal y Ambiental de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional Autónoma de Chota, **hace constar** que la tesis de investigación titulada **"Modelamiento predictivo de áreas propensas a incendios forestales y análisis de factores ambientales mediante los Sistemas de Información Geográfica en la provincia de Chota"**; ejecutada por el Bachiller **Iván Fernández Alvarado** de la Escuela Profesional de Ingeniería Forestal y Ambiental, **asesorado por el Dr. Jim Jairo Villena Velásquez (Asesor) e Ing. Eiler Llatas Mires (Coasesor)**; presenta un **ÍNDICE DE SIMILITUD DEL 18%**, sin incluir bibliografía; por lo tanto, cumple con el criterio de evaluación de originalidad establecido en el REGLAMENTO DE GRADOS Y TÍTULOS DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE CHOTA aprobado mediante RESOLUCIÓN DE COMISIÓN ORGANIZADORA N.º 770-2025-UNACH.

Se expide la presente, a petición de la parte interesada para los fines que estime conveniente.

Chota, 23 de diciembre de 2025

Atentamente




Dr. Jim Jairo Villena Velásquez
(Asesor)

Ivan FERNANDEZ ALVARADO

IVAN FERNANDEZ

 IVAN FERNANDEZ

 IVAN FERNANDEZ

 Universidad Nacional Autonoma de Chota

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::1:3450096029

Fecha de entrega

22 dic 2025, 8:11 p.m. GMT-5

Fecha de descarga

22 dic 2025, 8:28 p.m. GMT-5

Nombre del archivo

Informe_final_de_Tesis_-_Ivan_Fernandez_Alvarado.docx

Tamaño del archivo

15.5 MB

81 páginas

14.503 palabras

85.347 caracteres




18% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- ▶ Coincidencias menores (menos de 14 palabras)

Fuentes principales

- 16%  Fuentes de Internet
- 8%  Publicaciones
- 13%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Fuentes principales

- 16% Fuentes de Internet
- 8% Publicaciones
- 13% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Fuentes principales

Las fuentes con el mayor número de coincidencias dentro de la entrega. Las fuentes superpuestas no se mostrarán.

1	Internet	repositorio.unach.edu.pe	1%
2	Internet	renati.sunedu.gob.pe	1%
3	Internet	www.repositorio.unach.edu.pe	1%
4	Internet	hdl.handle.net	<1%
5	Internet	alicia.concytec.gob.pe	<1%
6	Internet	repositorio.utn.edu.ec	<1%
7	Trabajos del estudiante	Universidad Cesar Vallejo	<1%
8	Trabajos del estudiante	Universidad Rey Juan Carlos	<1%
9	Internet	revistas.uned.ac.cr	<1%
10	Internet	www.gob.pe	<1%
11	Internet	revistas.uniandes.edu.co	<1%

12	Internet	repositorio.unc.edu.pe	<1%
13	Internet	www.revistas.una.ac.cr	<1%
14	Trabajos del estudiante	Associatie K.U.Leuven	<1%
15	Internet	recimundo.com	<1%
16	Internet	rte.espol.edu.ec	<1%
17	Trabajos del estudiante	Universidad Nacional Abierta y a Distancia, UNAD,UNAD	<1%
18	Trabajos del estudiante	Universidad Andina Nestor Caceres Velasquez	<1%
19	Internet	ojs.uc.cl	<1%
20	Internet	repositorio.ucv.edu.pe	<1%
21	Internet	revistas.unasam.edu.pe	<1%
22	Trabajos del estudiante	Universidad Andina del Cusco	<1%
23	Internet	comunicacion-cientifica.com	<1%
24	Internet	geox.udistrital.edu.co	<1%
25	Internet	camjol.info	<1%

26	Publicación	Suárez Albarracín, Nadia Luz. "Estimación de Áreas Afectadas por Incendios en la ..."	<1%
27	Trabajos del estudiante	University of Aberdeen	<1%
28	Internet	www.grafiati.com	<1%
29	Internet	www.undp.org	<1%
30	Publicación	Víncler Fernandes Ribeiro de Oliveira, Edson Dos Santos da Silva, Erivelton Pereir...	<1%
31	Internet	revistadelamazonas.info	<1%
32	Internet	revistas.unl.edu.ec	<1%
33	Trabajos del estudiante	Universidad Católica Boliviana "San Pablo"	<1%
34	Internet	repositorio.lamolina.edu.pe	<1%
35	Trabajos del estudiante	CONACYT	<1%
36	Trabajos del estudiante	Universidad de Cartagena	<1%
37	Trabajos del estudiante	Colegio de Postgraduados	<1%
38	Internet	journal.espe.edu.ec	<1%
39	Internet	repositorio.senamhi.gob.pe	<1%

40	Internet	repositorio.unsaac.edu.pe	<1%
41	Internet	revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe	<1%
42	Trabajos del estudiante	Universidad Internacional del Ecuador	<1%
43	Internet	cienciasforestales.inifap.gob.mx	<1%
44	Internet	dspace.ups.edu.ec	<1%
45	Trabajos del estudiante	Universidad Nacional Autonoma de Chota	<1%
46	Publicación	Miguel E. Castillo Soto, Juan R. Molina Martínez, Santiago Bonilla B, Roberto A. Mo...	<1%
47	Internet	www.polodelconocimiento.com	<1%
48	Internet	www.researchgate.net	<1%
49	Internet	sinia.minam.gob.pe	<1%
50	Internet	iris.polito.it	<1%
51	Internet	repositorio.continental.edu.pe	<1%
52	Internet	www.repositorio.iesppazangaro.edu.pe	<1%
53	Publicación	Mauricio Alejandro Perea Ardila. "IDENTIFICACIÓN DE ÁREAS PRIORITARIAS PARA...	<1%

54	Internet	repositorio.unfv.edu.pe	<1%
55	Internet	revistas.usfx.bo	<1%
56	Internet	burjcdigital.urjc.es	<1%
57	Internet	dialnet.unirioja.es	<1%
58	Trabajos del estudiante	RMIT University	<1%
59	Internet	docplayer.es	<1%
60	Internet	elperuano.pe	<1%
61	Internet	repository.usta.edu.co	<1%
62	Trabajos del estudiante	unsaac	<1%
63	Internet	www.editage.jp	<1%
64	Trabajos del estudiante	Universidad Continental	<1%
65	Internet	bibliotecaunapec.blob.core.windows.net	<1%
66	Internet	dspace.ucuenca.edu.ec	<1%
67	Internet	repositorio.udec.cl	<1%

68	Internet	www.coursehero.com	<1%
69	Internet	2011.www.redalyc.org	<1%
70	Trabajos del estudiante	Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente	<1%
71	Trabajos del estudiante	Universidad Católica de Santa María	<1%
72	Trabajos del estudiante	Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco	<1%
73	Internet	dgrs.unmsm.edu.pe	<1%
74	Internet	openknowledge.worldbank.org	<1%



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE CHOTA
VICEPRESIDENCIA ACADÉMICA
Reglamento de Grados y Títulos



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE INFORME FINAL DE TESIS

REG. N° 056-2025-FCA

El jurado evaluador designado con **RESOLUCIÓN DE COORDINACIÓN DE FACULTAD N.° 513-2025-FCA/UNACH:**

Nombres y apellidos	Cargo
M. Sc. James Alexander Chamaya Gonzáles	Presidente
Dr. Alejandro Seminario Cunya	Secretario
M. Sc. Leyla Catherine Alarcón Alarcón	Vocal

De la tesis titulada:

Modelamiento predictivo de áreas propensas a incendios forestales y análisis de factores ambientales mediante los Sistemas de Información Geográfica en la provincia de Chota

Que ha sustentado el(los) Bachiller (es):

Nombres y apellidos	DNI
Iván Fernández Alvarado	71123521

Para obtener el título profesional de:

Ingeniero Forestal y Ambiental

Acuerdan por:

Unanimidad Mayoría

Aprobar Desaprobar

Otorgando la calificación de:

<input checked="" type="checkbox"/>	Aprobado
	Excelente
<input checked="" type="checkbox"/>	Bueno
	Regular

Desaprobado

Colpa Matara, 25 de noviembre del 2025.

M. Sc. James Alexander Chamaya Gonzáles
Presidente

Dr. Alejandro Seminario Cunya
Secretario

Mtr. Leyla Catherine Alarcón Alarcón
Vocal

Dr. Jim Jáiro Villena Velásquez
Asesor

Ing. Elier Llatas Mires
Coasesor

Dedicatoria

Dedico esta tesis principalmente a Dios, por haberme dado vida y salud para permitirme el haber llegado hasta este momento tan importante de mi formación profesional. A mi madre, por ser el pilar fundamental y por demostrarme siempre su cariño y apoyo incondicional sin importar mi personalidad. A mi padre, por ser mi soporte emocional y una gran persona dedicada a la organización social un hombre de lucha y triunfo.

Y a todos los que me brindaron su apoyo en el día a día en este largo viaje académico para poder lograr unos de mis grandes objetivos en la vida.

Agradecimientos

A mi familia en general, cada uno de mis profesores a lo largo de todos los ciclos de la carrera, compañeros, asesor, coasesor y a todos mis amigos los que de alguna manera u otra me brindaron todo su apoyo técnico y emocional para realizar mi tesis de una manera adecuado para así poder aportar conocimiento y solucionar problemas que aquejan a nuestra sociedad.

Índice de contenidos

Acta de sustentación	2
Dedicatoria	3
Agradecimientos	4
Índice de contenidos	5
Índice de tablas	7
Índice de figuras.....	7
Resumen.....	9
Abstract.....	10
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	11
1.1. Planteamiento del problema	11
1.2. Formulación del problema.....	14
1.3. Justificación.....	15
1.4. Objetivos.....	16
1.4.1. Objetivo general	16
1.4.2. Objetivos específicos.....	16
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	17
2.1. Antecedentes.....	17
2.2. Bases teóricas – científicas.....	20
2.3. Marco conceptual	28
2.4. Hipótesis	31
2.5. Operacionalización de variables.....	31

CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO.....	32
3.1. Tipo y nivel de investigación	32
3.2. Diseño de investigación.....	32
3.3. Métodos de investigación.....	32
3.4. Población, muestra y muestreo.....	33
3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos	35
3.6. Técnicas de procesamiento y análisis de datos.....	36
3.7. Aspectos éticos	37
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	38
4.1. Descripción de resultados.....	38
4.2. Contrastación de hipótesis.....	55
4.3. Discusión de resultados	56
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	63
CAPÍTULO VI. REFERENCIAS.....	66
CAPÍTULO VII. ANEXOS.....	75

Índice de tablas

Tabla 1 Operacionalización de variables	31
--	----

Índice de figuras

Figura 1 Diagrama de un sensor pasivo versus un sensor activo.....	26
Figura 2 Metodología de la investigación.....	33
Figura 3 Ubicación y localización del área de estudio	34
Figura 4 Variable temperatura del área de estudio	39
Figura 5 Variable precipitación del área de estudio	40
Figura 6 Variable pendiente del área de estudio.....	41
Figura 7 Variable cobertura vegetal del área de estudio.....	42
Figura 8 Variable focos de calor del área de estudio.....	43
Figura 9 Distribución espacial de la variable temperatura ($>15\text{ }^{\circ}\text{C}$) como condición para incendios forestal en el área de estudio.....	44
Figura 10 Distribución espacial de la variable precipitación (81 mm) como condición para incendios forestal en el área de estudio.....	45
Figura 11 Distribución espacial de la variable pendiente ($>20\%$) como condición para incendios forestal en el área de estudio.....	46
Figura 12 Distribución espacial de la variable cobertura vegetal (SI/NO) como condición para incendios forestal en el área de estudio.....	47
Figura 13 Modelo 01 de predicción de incendios forestales a partir de la integración de las cuatro variables de estudio en la provincia de Chota.....	48
Figura 14 Modelo 02 de predicción de incendios forestales a partir de la integración de las cuatro variables de estudio y los focos de calor en la provincia de Chota.....	49
Figura 15 Índice de calcinación normalizada (NBR) en el área de estudio.....	51
Figura 16 Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) en el área de estudio	52
Figura 17 Color natural de la imagen satelital Landsat 9 de la provincia de Chota	53
Figura 18 Áreas visitadas en campo	54

Figura 19 Representación cartográfica de las variables de estudio en la provincia de Chota	75
Figura 20 Áreas con antecedentes o riesgo de incendios forestales en el distrito de Tacabamba	76
Figura 21 Áreas con antecedentes o riesgo de incendios forestales en el distrito de Conchán ...	77
Figura 22 Áreas con antecedentes o riesgo de incendios forestales en el distrito de Querocoto.	78
Figura 23 Áreas con antecedentes o riesgo de incendios forestales en el distrito de Miracosta .	79
Figura 24 Áreas con antecedentes o riesgo de incendios forestales en el distrito de Chalamarca	80
Figura 25 Áreas con antecedentes o riesgo de incendios forestales en el distrito de Lajas.....	81

Resumen

El presente estudio tuvo como objetivo generar un modelo predictivo de áreas propensas a incendios forestales y analizar los factores ambientales mediante los Sistemas de Información Geográfica (SIG) en la provincia de Chota. La metodología se basó en la recopilación de información climática, topográfica, cobertura vegetal y focos de calor, así como en el procesamiento de imágenes satelitales; se integraron variables como precipitación, temperatura, pendiente y cobertura vegetal mediante herramientas de análisis espacial y modelamiento en SIG, además de aplicar el Índice de Calcinación Normalizada (NBR) a partir de imágenes Landsat 9 y realizar verificaciones en campo en localidades como Tacabamba, Conchán, Querocoto, Miracosta, Chalamarca y Lajas. Los resultados muestran dos modelos predictivos: el Modelo 01, que identificó 2 048,43 km² de áreas propensas a incendios forestales considerando las cuatro variables de estudio, y el Modelo 02, que incluyó además los focos de calor, delimitando 777,96 km² de áreas críticas; adicionalmente, el análisis del NBR permitió identificar 16,95 km² con alta severidad de afectación. Se concluye que los incendios forestales están influenciados principalmente por altas temperaturas, baja precipitación, pendientes pronunciadas y vegetación densa, y que la integración de estas variables en un entorno SIG constituye una herramienta eficaz para identificar zonas de riesgo, mejorar la planificación territorial, prevenir incendios forestales y proteger ecosistemas y comunidades vulnerables. Asimismo, los resultados demuestran la efectividad y aplicabilidad del modelo predictivo en la identificación de áreas críticas, lo que lo convierte en una herramienta valiosa para la gestión ambiental y la toma de decisiones.

Palabras clave: incendio forestal, modelos predictivos, factores ambientales, análisis geoespacial.

Abstract

The present study aimed to generate a predictive model of wildfire-prone areas and analyze environmental factors using Geographic Information Systems (GIS) in the province of Chota. The methodology was based on the collection of climatic, topographic, vegetation cover, and hotspot information, as well as the processing of satellite images. Variables such as precipitation, temperature, slope, and vegetation cover were integrated using spatial analysis and GIS modeling tools. The study also included the Normalized Burning Rate (NBR) from Landsat 9 images and field verifications in locations such as Tacabamba, Conchán, Querocoto, Miracosta, Chalamarca, and Lajas. The results show two predictive models: Model 01, which identified 2,048.43 km² of wildfire-prone areas considering the four study variables, and Model 02, which also included hotspots, delimiting 777.96 km² of critical areas. Additionally, the NBR analysis identified 16.95 km² with high severity of damage. It is concluded that wildfires are primarily influenced by high temperatures, low rainfall, steep slopes, and dense vegetation, and that integrating these variables into a GIS environment constitutes an effective tool for identifying risk zones, improving territorial planning, preventing wildfires, and protecting vulnerable ecosystems and communities. The results also demonstrate the effectiveness and applicability of the predictive model in identifying critical areas, making it a valuable tool for environmental management and decision-making.

Keywords: wildfire, predictive models, environmental factors, geospatial analysis.

CAPÍTULO I.

INTRODUCCIÓN

1.1. Planteamiento del problema

Durante las últimas décadas, se han registrado numerosos incendios forestales, los cuales han adquirido una relevancia crucial como problema medioambiental, estos incendios ocasionan la pérdida de especies tanto vegetales como animales, generando impactos económicos y ecológicos, y que contribuyen a la degradación del suelo y a la desertificación del paisaje; la reducción de los recursos hídricos y la contaminación del aire (Polo, 2022). Los incendios forestales se consideran la causa más importante de pérdida de vegetación, cabe señalar que los incendios forestales causan grandes pérdidas y sus consecuencias son muy perjudiciales para los recursos naturales (Meza, 2021).

En el ámbito mundial, el pronóstico sobre los incendios forestales aumentan en frecuencia y gravedad debido al cambio de uso de la tierra, el fenómeno de El Niño, cambio climático y el calentamiento global (Rotonto, 2021). Australia experimentó una devastación sin precedentes debido a incendios forestales de proporciones masivas, que consumieron más de 26,4 millones de hectáreas, superando en tamaño al estado de Virginia; estos incendios destruyeron miles de hogares, medios de subsistencia y estructura, y se calcula que más de 1 250 millones de animales perdieron la vida como resultado directo o indirecto de estos incendios (Fienco *et al.*, 2019).

En América Latina los incendios dañan principalmente a coberturas forestales, que afectan la mayoría de la región amazónica; en tanto, en América del Sur, los humedales se han visto afectados particularmente el Pantanal, un humedal tropical localizado entre Brasil, Bolivia y Paraguay, viéndose afectados por los incendios forestales (BBC News Mundo, 2020).

Según el Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI, 2016), se produjeron 281 incendios forestales en Perú, registrándose el mayor número (93) en el mes de noviembre del 2016; los incendios forestales con mayor fuerza se dieron en los pastizales de la región andina, con una superficie total de pérdida de 38 930,00 ha; además estos incendios se dan también en regiones de selva y regiones altoandinas, generando impactos adversos en el medio ambiente; como también se han observado un incremento en los incendios forestales causados por actividades humanas en los últimos años, las cuales están relacionados a cambiar el uso del suelo (actividades ancestrales que involucran a la agricultura), lo que resulta la destrucción de bosques, especies de flora y fauna, conllevando a su total extinción (Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres [CENEPRED], 2021).

La acción humana continua siendo una de las principales razones detrás de los incendios forestales, lo que complica considerablemente la creación de un modelo predictivo para estos eventos, que alerte de una manera efectiva acerca de la zonas que puedan verse afectadas; no obstante el uso de la teledetección ayuda a contribuir significativamente a la generación de índices de riesgos que reflejan el estado de la vegetación y la temperatura de la superficie, variables que son claves en estos estudios (Requelme, 2020).

En los últimos años, la mayoría de las aplicaciones de teledetección para el monitoreo de incendios forestales se han enfocado en la detección precoz mediante el uso de datos de sensores que recopilan información de rango infrarrojo medio (Suarez, 2021). Los Sistemas de Información Geográfica (SIG), se han convertido en aliado fundamental en la rápida respuesta frente a estos eventos, remplazando a la “imágenes estáticas” y haciendo que la lucha contra incendios sea más eficiente, por ello la gran importancia de su utilización, el cual nos permite visualizar la

información y el análisis de datos espaciales, analizando estos datos podemos obtener indicadores de modelos predictivos de incendios forestales y tomar medidas preventivas (Aliaga *et al.*, 2018).

En el año 2016, la región Cajamarca reportó aproximadamente 23 incendios forestales, ocasionando una pérdida de vegetación de 27 561 ha. La mayoría de estos eventos se originaron por actividades humanas, como la quema de terrenos agrícolas y el cambio de uso de suelo (Nakada, 2022). Estas prácticas, sumadas a condiciones climáticas desfavorables, incrementan la vulnerabilidad de la región frente a los incendios.

En provincias como Chota, los incendios han alcanzado gran magnitud. Un ejemplo ocurrió en el distrito de Chalarmarca, donde se consumieron cerca de 150 ha, afectando áreas reforestadas, hábitats de diversas especies, viviendas y obligando a familias a desplazarse. Estos impactos no solo generaron pérdidas de vegetación, fauna y flora, sino también significativas pérdidas económicas (CENEPRED, 2022).

Los modelos predictivos de incendios forestales se basan en datos geoespaciales y climáticos para anticipar la ocurrencia y propagación de incendios. Al integrar información sobre topografía, cobertura vegetal y condiciones meteorológicas, permiten identificar zonas de riesgo y mejorar la gestión preventiva, reduciendo los impactos de estos eventos (Cáceres, 2023).

En la provincia de Chota aún no se han desarrollado investigaciones relacionadas con modelos predictivos de incendios forestales mediante Sistemas de Información Geográfica. Surge entonces la pregunta: ¿Qué factores contribuyen a los incendios forestales en Chota y cómo pueden modelarse para predecirlos y gestionarlos de manera más efectiva? Responder a esta interrogante resulta fundamental, ya que el uso de modelos predictivos constituye una herramienta clave para comprender y anticipar la ocurrencia de incendios, sean de origen humano o natural.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema general

¿Cuál es el modelo predictivo de áreas propensas a incendios forestales y el análisis de factores ambientales mediante los Sistemas de Información Geográfica en la provincia de Chota?

1.2.2. Problemas específicos

¿Cuáles son los factores ambientales que influyen en los incendios forestales mediante los Sistemas de Información Geográfica en la provincia de Chota?

¿Cuáles son las técnicas de modelamiento en Sistemas de Información Geográfica (SIG) para simular la distribución espacial de las áreas propensas a incendios forestales, integrando diferentes capas de información geoespacial?

¿Cuál es el Índice de Calcinación Normalizada (NBR) en los incendios forestales mediante el uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) en la provincia de Chota?

1.3. Justificación

Para Nakada (2022) los incendios forestales son reconocidos como una perturbación significativa en los ecosistemas forestales tanto a nivel regional como local, además tienen repercusiones socioeconómicas de gran relevancia que impactan en la vida de la población; estos incendios son causados por actividades humanas y naturales; las actividades humanas principalmente son para la deforestación y convertir en tierras de uso agrícola, desbrozar cultivos y establecer nuevos asentamientos urbanos; estos eventos son un gran problema dado que sus consecuencias se manifiestan de muchas maneras y tienen un efecto devastador en la naturaleza (Miguel *et al.*, 2020).

La razón de ser de este estudio radica en la imperiosa necesidad de prevenir y reducir los incendios forestales en la provincia de Chota, que esta vulnerable a estos eventos debido a factores climáticos y humanos. Los incendios forestales no solo provocan la destrucción de ecosistemas, sino que también representan una amenaza significativa para las comunidades locales y sus medios de vida. Emplear los SIG para modelar y predecir incendios forestales proporciona una base científica esencial para implementar estrategias preventivas y de respuesta, lo cual es vital para la protección del medio ambiente y la población.

El propósito de esta investigación fue desarrollar un modelo predictivo que identifique las áreas con mayor riesgo de incendios forestales en la provincia de Chota. Este modelo será una herramienta vital para las autoridades locales y regionales en la planificación y gestión territorial, permitiendo enfocar los esfuerzos de prevención y optimizar los recursos destinados a la lucha contra incendios. Además, los resultados de este estudio pueden contribuir al desarrollo de políticas públicas más efectivas y a aumentar la conciencia sobre la importancia de la gestión del riesgo de incendios en la región.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Generar un modelo predictivo de áreas propensas a incendios forestales y análisis de factores ambientales mediante los Sistemas de Información Geográfica en la provincia de Chota.

1.4.2. Objetivos específicos

Analizar los factores ambientales que influyen en los incendios forestales mediante los Sistemas de Información Geográfica en la provincia de Chota.

Aplicar técnicas de modelamiento en Sistemas de Información Geográfica (SIG) para simular la distribución espacial de las áreas propensas a incendios forestales, integrando diferentes capas de información geoespacial.

Identificar el Índice de Calcinación Normalizada (NBR) en los incendios forestales mediante el uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) en la provincia de Chota.

CAPÍTULO II.

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

2.1.1. Internacionales

Reyes y Balcazar (2021) estudiaron los “Factores que inciden en la probabilidad de ocurrencia de incendios forestales en Ecuador”, donde los datos de incendios forestales se obtuvieron de *Active Fire Data Platform*, como variable independiente; la información climática se obtuvo de WorldClim y se generó una variable relacionada al área de estudio, desde 2012-2018; los resultados mostraron la evidencia empírica sobre la vegetación más susceptible a los incendios forestales; además la vegetación se encuentra a los 2 700 m de las actividades humanas, asimismo, dependiendo de las variables utilizadas, se pudo comprobar que la temporada de incendios forestales abarca los meses de julio, agosto y septiembre.

Zhiminaicela *et al.* (2020) estudiaron un “Algoritmo Semiautomático para Mapear Incendios Forestales y Estimar la Recuperación Vegetal Mediante Imágenes Landsat-8” donde propusieron y analizaron información derivada de cálculos de índices espectrales; se realizó el cálculo del índice espectral y se determinó el índice de mejor ajuste a través del análisis visual y la aplicación de la prueba de correlación *Pearson* con un nivel de confianza de 95%; los resultados mostraron una correlación entre ellos con referencia al Índice de calcinación Normalizada (NBR), donde es posible delimitar las áreas y que estas estén en constante evaluación con regeneración vegetativa.

Vargas y Campos (2018) en su estudio “Modelo de vulnerabilidad ante incendios forestales para el Área de Conservación Guanacaste, Costa Rica”, se centraron en la implementación de un modelo de evaluación de vulnerabilidad ante incendios forestales con el propósito de identificar áreas prioritarias para la protección contra incendios en al área de Conservación Guanacaste

(ACG), los hallazgos revelan que las zonas más susceptibles a los incendios dentro del ACG albergan especies con un elevado valor ecológico y ofrecen una amplia gama de servicios ecosistémicos, asimismo, se postula que este modelo podría ser adaptable a otras áreas protegidas que comparten características ecológicas y socioeconómicas similares a las del ACG, además, se observó que las áreas con una alta vulnerabilidad están caracterizadas por la presencia predominante de especies de regeneración y hábitats con una baja fragmentación.

Columba *et al.* (2016) investigaron la “Identificación de zonas de recurrencia de incendios forestales mediante análisis multitemporal y aplicación de índices espectrales, en el distrito metropolitano de Quito”, se basaron en identificar y extraer áreas afectadas en áreas boscosas del área metropolitana de Quito en 1991, 1996, 2000, 2001, 2009 y 2012 utilizando el análisis multitemporal e índices espectrales de imágenes de alta resolución, imágenes Landsat Sensor TM e ETM y RapidEye; los resultados mostraron que el índice de superficie quemada (IAQ) permitió una identificación más clara de las zonas afectadas por el fuego, analizando otros índices de interés para identificar las zonas quemadas es necesario trabajar con imágenes satelitales de alta resolución para una mejor identificación de áreas quemadas.

Así mismo, Ibarra y Huerta (2015) en su estudio “Modelado espacial de incendios: una herramienta predictiva para el Bosque La Primavera, Jalisco México”, donde desarrollaron un modelo espacial para ayudar a identificar áreas probables a incendios forestales en la región; el modelo integró variables meteorológicas, paisajísticas, inflamables, antropogénicas y/o causales e incendios históricos ocurridos entre 1998 y 2012; el resultado mostró un modelo de gran área con potencial para identificar incendios forestales en la parte central y noreste de la cordillera de Jalisco; asimismo existen pequeñas áreas aisladas de potencial en la parte oriental del área de estudio.

2.1.2. Nacionales

Marin (2022) realizó un estudio sobre el uso de “Sistemas de información geográfica y teledetección para analizar incendios forestales y sus consecuencias en el refugio de vida silvestre Laquipampa”, se basó en analizar los incendios forestales mediante la teledetección para poder tomar medidas para restaurar zonas afectadas por los incendios; donde utilizaron índices espectrales con el NDVI, para reconocer tipos de dinamismos fotosintética y NBR, que indica la gravedad del incendio; los resultados mostraron que el análisis de teledetección posterior al incendio indicaron que el área ha sido completamente revegetada y que se mejoró el equilibrio del ecosistema mediante la planificación de especies forestales como la Tara.

Añamuro (2019) en su investigación sobre la detección de áreas afectadas por incendios forestales en la Reserva Nacional Titicaca en 2016; para identificar las áreas quemadas se contrasto los puntos calientes los sensores MODIS y VIRIS fueron utilizados para capturar imágenes compuestas en el esquema (RGB) utilizando las bandas 7-6-5, posteriormente, se aplicó un proceso de clasificación supervisada a estas imágenes; se calculó índice espectral NBR y NDVI, para identificar la gravedad y la actividad fotosintética, utilizando imágenes satelitales Landsat 7, 8 y Sentinel 2; los resultados arrojaron que la mayor superficie fue en la reserva 02 con un área 8 655,22 ha, mientras que la reserva 01 tuvo una área de 515,46 ha, presentado una severidad que va desde baja hasta alta.

Benavides (2020) en su investigación sobre el “Análisis de la severidad del incendio forestal suscitado en Granja Porcón, a través de imágenes Sentinel - 2 – Periodo 2019 - 2021, Cajamarca”, las imágenes satelitales se descargaron y procesaron en el software QGIS 3.10 para caracterizar el área y calcular los índices espectrales, (NBR), (NDVI) y (SAVI); los resultados mostraron las áreas forestales, áreas agrícolas y áreas no forestales, aumentado las dos primeras áreas debido a

la actividad humana de 2019 a 2021; se concluyó que el índice espectral NBR permitió la identificación más precisa el área dañada del bosque Granja Porcón.

2.2. Bases teóricas – científicas

2.2.1. Incendio forestal

La difusión no deseada e incontrolada del fuego en áreas como bosques, pastizales, matorrales u otros tipos de cobertura vegetal, conlleva consecuencias ecológicas, económicas y sociales significativas. Este fenómeno se ve facilitado por condiciones meteorológicas adversas, como altas temperaturas, vientos fuertes y escasez de precipitaciones. La acumulación de material combustible, como hojas secas, residuos de vegetación, arbustos y pastos de rápido crecimiento, contribuye a la rapidez y extensión de los incendios forestales (Instituto Nacional de Defensa Civil [INDECI], 2023).

2.2.2. Tipos de incendios forestales

De acuerdo a la capa vegetal que afectan (Comisión Nacional Forestal [CONAFOR], 2022) lo clasifica en:

❖ Superficiales

Este fenómeno se manifiesta mediante la propagación del fuego a nivel del suelo, alcanzando alturas de hasta un metro y medio, y ejerce su impacto en los combustibles vivos y muertos presentes en el ecosistema, estos incluyen hierbas, hojas, ramitas, pequeñas ramas, arbustos de escasa envergadura, árboles tanto plantados como en proceso de regeneración natural, así como troncos en estado de descomposición (CONAFOR, 2022).

❖ Subterráneos

Cuando ocurre la propagación de un incendio de tipo superficial bajo la superficie del suelo, se observa la combustión de la materia orgánica acumulada, así como de las raíces, pudiendo

extenderse incluso hasta los afloramientos rocosos, este tipo de incendios tienden a carecer de llamas significativas y generan una emisión de humo mínima (CONAFOR, 2022).

❖ **De copa o aéreos**

Este tipo de incendios suelen ser los más destructivos, peligrosos y difíciles de controlar, ya que los incendios consumen toda la vegetación; también parte de la superficie, pero en este caso las llamas primero se mueven por encima del suelo y se propagan a lo largo de un continuo vertical, es decir, trepan por la vegetación, sirve de combustibles en escalera hasta la copa de los árboles (CONAFOR, 2022).

Para que se produzca un incendio forestal se necesitan tres elementos: Triángulo del fuego = calor + oxígeno + combustibles.

2.2.3. Causas de incendios forestales

Según el Ministerio del Ambiente (MINAM, 2023), el 98% de los incendios forestales tienen su origen en actividades antropogénicas, principalmente asociadas a prácticas de quemas agrícolas. Durante el periodo comprendido entre los años 2000 y 2023, se han documentado más de 30 000 incendios en el Perú, entre las causas más recurrentes se encuentran:

- ❖ Quema de restos agrícolas y residuos sólidos.
- ❖ Quema de pastizales.
- ❖ Quema intencional por traficantes de terreno.
- ❖ Accidentes por fogatas, colillas de cigarrillos y otros.
- ❖ Quema de bosque para ampliar áreas para la agricultura.
- ❖ Reducción de bosque nativo por el ingreso de especies exóticas.

2.2.4. Factores que influyen en los incendios forestales

- ❖ Climáticos: estos factores están influenciados por la temperatura, humedad, velocidad del viento, y patrones meteorológicos estacionales (Ramos y Reyes, 2022).
- ❖ Topográficos: estrechamente relacionado con la pendiente, orientación y altitud del terreno, que son unos de los factores desencadenantes de incendios forestales (Ramos y Reyes, 2022).
- ❖ Humanos: por presencia de actividades humanas en áreas forestales, y que en la mayoría de casos son el detonante para que se dé inicio a un incendio (Ramos y Reyes, 2022).

2.2.5. Impactos de los incendios forestales

- ❖ Ambientales: referidos a la pérdida de biodiversidad, degradación del suelo, alteración del ciclo hidrológico, emisiones de gases de efecto invernadero (Pazmiño, 2019).
- ❖ Económicos: relacionados con la pérdida de recursos forestales, daño a infraestructuras, y costos de extinción y restauración (Pazmiño, 2019).
- ❖ Sociales: el impacto en la sociedad está referida que surja el desplazamiento de comunidades, pérdidas de vidas humanas y efectos sobre la salud pública (Pazmiño, 2019).

2.2.6. Incendios forestales en Perú

Contempla un riesgo muy peligroso que se desarrollen y propaguen incendios forestales inducido por prácticas agrícolas como la quema de desechos para restaurar pastos, de chacras o la expansión de tierras agrícolas en las regiones andinas, la demandas de tierras derivadas de actividades de minería o la ampliación de carreteras, en las regiones de Amazonas y la parte norte Perú (Diario Oficial el Peruano, 2023).

El Ministerio del Ambiente (MINAM, 2023) informó que de enero a julio de este año se produjeron un total de 1 078 incendios forestales en todo el país, afectando el 70 % del territorio de las regiones de Apurímac, Huancavelica, Ayacucho y Cajamarca; Asimismo, se evidenció que los

departamentos de Puno, Áncash, La Libertad, Cusco, Junín y Lima exhiben más del 50% del territorio afectado por los incendios forestales, este aumento preexistente ha impactado negativamente en ecosistemas de alta montaña, incluyendo los pastizales de la puna andina, así como en bosques naturales y matorrales.

2.2.7. Estrategias de prevención y mitigación de incendios forestales

- ❖ Educación y conciencia pública: desarrollar programas educativos dirigidos al público para crear conciencia sobre la importancia de prevenir incendios, identificar sus causas comunes y promover conductas responsables, como evitar arrojar colillas encendidas, realizar fogatas solo en áreas designadas, y manejar de manera segura el fuego en actividades agrícolas; además, fomentar la formación de grupos comunitarios para la prevención y respuesta ante incendios, capacitados para intervenir rápidamente en emergencias, detectar incendios incipientes y colaborar con las autoridades en las labores de extinción (Colonico *et al.*, 2022).
- ❖ Regulación del uso del fuego: implementar leyes y reglamentos estrictos sobre el uso del fuego, especialmente en actividades como la quema agrícola. Estas normativas deben incluir requisitos de permisos, supervisión adecuada, y monitoreo por parte de las autoridades; además de proporcionar entrenamiento especializado a agricultores y comunidades sobre la realización segura de quemas controladas, minimizando el riesgo de que se conviertan en incendios incontrolados (Colonico *et al.*, 2022).
- ❖ Monitoreo y alerta temprana: implementar sistemas de monitoreo con sensores de temperatura, humedad y viento en zonas forestales para identificar rápidamente condiciones favorables para la ignición de incendios; también usar imágenes satelitales y drones equipados con cámaras térmicas para una observación continua del estado de la vegetación y la detección de focos de calor (Colonico *et al.*, 2022).

- ❖ Establecimiento de cortafuegos: crear zonas sin vegetación que actúen como barreras para detener o desacelerar el avance del fuego. Estas barreras pueden ser tanto naturales (como ríos o caminos) como artificiales (mediante la eliminación de vegetación) (Ramos *et al.*, 2018).
- ❖ Reforestación y restauración de ecosistemas: reforestar con especies de plantas menos inflamables o con adaptaciones naturales al fuego en áreas propensas a incendios, lo cual ayuda a reducir la propagación del fuego; además, tras un incendio, es fundamental restaurar los suelos y ecosistemas afectados para evitar la erosión y promover la recuperación de la biodiversidad, lo que incluye la revegetación con especies nativas y la restauración de cuencas hidrográficas (Ramos *et al.*, 2018).
- ❖ Gestión y ordenamiento territorial: desarrollar planes de uso del suelo que minimicen la exposición a incendios forestales, como limitar la construcción de viviendas en áreas de alto riesgo; asimismo, establecer zonas de amortiguamiento alrededor de comunidades o infraestructuras críticas, donde se maneje activamente la vegetación para reducir el riesgo de incendios (Ramos *et al.*, 2018).

2.2.8. Modelo predictivo de incendios forestales

Estos modelos tienen una estrecha relación con el uso de los sistemas de información geográfica, el cual es establecer un modelo a base de variables ambientales y el uso de imágenes satelitales, proporcionando información de tipo cartográfico y estadístico; donde aplicando el análisis estadístico de regresión logística se obtienen modelos de predicción de ocurrencia de incendios naturales y por causa humana (Carrillo *et al.*, 2012).

2.2.9. Sistemas de Información Geográfica

Los (SIG) representan un marco metodológico para la adquisición, gestión y análisis de datos, estos sistemas tienen sus fundamentos en el ámbito de la ciencia geográfica, integrando una amplia gama de datos y haciendo uso de herramientas cartográficas y representaciones tridimensionales para el análisis de ubicaciones espaciales; los SIG permiten la organización de múltiples capas de información para su visualización, destacando por su capacidad única para revelar patrones, relaciones y situaciones complejas dentro de los datos geoespaciales; esto, a su vez, facilita a los usuarios la toma de decisiones informadas y estratégicas (Castillo *et al.*, 2012).

2.2.10. Teledetección

Para Añamuro (2019) es la ciencia mediante la cual las propiedades de los objetos de interés pueden identificarse o analizarse de manera similar sin contacto directo.

La teledetección es un método para obtener información sobre objetos distantes sin contacto directo (Salcedo, 2021). Esto es posible porque existe o se genera un campo de fuerza entre el sensor y el objeto detectado, los campos de fuerza que se pueden utilizar son ondas mecánicas en sólido (sismología) u ondas mecánicas en fluidos (ondas de sonido); de este modo se puede generar y analizar una imagen de la radiación incidente en el sensor (Aliaga, 2021).

La teledetección tiene muchas aplicaciones estos algunos principios básicos:

❖ Órbitas

Los satélites se pueden colocar en diferentes órbitas alrededor de la tierra; los tres tipos más comunes son la órbita terrestre baja (entre 160 y 200 km de la tierra), la órbita terrestre media (entre 2 000 y 35 500 km de la tierra) y la órbita terrestre alta (a 35 500 km de la tierra); la altitud orbital del satélite es de 35 786 km y la velocidad orbital corresponde a la rotación de la tierra

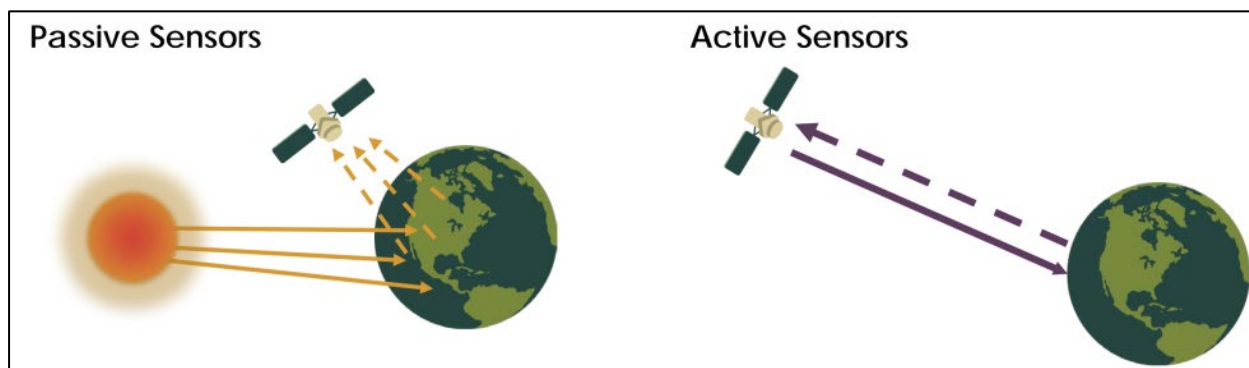
llamada geosincronica (OSG) (La Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio [NASA], 2023).

❖ **Sensores**

Los sensores o instrumentos de satélite y aviones miden la energía reflejada utilizando el sol como fuente de iluminación o proporcionando su propia fuente de energía; los sensores que utilizan energía solar natural se denominan sensores pasivos; los que suministran su propia energía se denominan sensores activos (NASA, 2023).

Figura 1

Diagrama de un sensor pasivo versus un sensor activo



Fuente: Tomado de NASA (2023).

❖ **Resolución**

La resolución influye en cómo se puede utilizar los datos de un sensor; la resolución puede variar según la órbita del satélite y el diseño del sensor; hay cuatro tipos de resoluciones a considerar para cualquier conjunto de datos: la radiometría se refiere a la cantidad de información contenida en cada píxel de una imagen; la resolución espacial se define por el tamaño de cada píxel dentro de una imagen digital y el área de la superficie terrestre que cada píxel representa; la resolución espectral describe la capacidad de un sensor para distinguir entre diferentes longitudes de onda con mayor precisión; por último, la resolución temporal hace referencia al período de tiempo necesario

para que un satélite complete una órbita y vuelva a capturar imágenes de la misma área de observación. (NASA, 2023)

2.2.11. Imágenes satelitales

Las imágenes satelitales consisten en una representación visual de datos capturados por sensores instalados en satélites artificiales, estos dispositivos recogen información reflejada desde la superficie terrestre y la transmiten de vuelta al planeta, donde se lleva a cabo su procesamiento correspondiente (Universidad de Ciencias y Humanidades [UCH], 2023).

Existen diferentes tipos de imágenes satelitales, estos dependen del tipo de sensor y la finalidad de captación:

- ❖ Imágenes pancromáticas
- ❖ Imágenes multiespectrales
- ❖ Imágenes hiperespectrales

Las imágenes satelitales las podemos aplicar en diferentes investigaciones como: la planificación urbana, mapeos, infraestructura, alineamientos, recursos naturales, agricultura investigación ambiental, asuntos militares, etc.

2.3. Marco conceptual

2.3.1. Bosque

Los ecosistemas donde las especies de árboles son dominantes en cualquier fase de su desarrollo, caracterizados por una cobertura del dosel superior al 10% en condiciones de aridez o semiáridos, y que supera el 25% en condiciones ambientales más favorables (Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre [SERFOR], 2016).

2.3.2. Plantaciones forestales

Son áreas de terreno establecidas mediante la siembra o plantación deliberada de árboles, generalmente de una o pocas especies, con fines productivos, protectores o ecológicos. Estas plantaciones pueden estar destinadas a la producción de madera, celulosa, leña u otros productos forestales, así como a la restauración de ecosistemas degradados, la protección de suelos y cuencas hidrográficas, o al aumento de la cobertura boscosa y la biodiversidad, dependiendo de su propósito y manejo (Bahamóndez *et al.*, 2013).

2.3.3. Especie forestal

Se define como todo vegetal perenne de estructura leñosa, fibrosa y básica, que proporciona madera y habita en la superficie terrestre, satisfaciendo tanto las necesidades fundamentales del ser humano como las de diversas especies animales (Añamuro, 2019).

2.3.4. Incendio

Es un fuego no controlado que se propaga libremente a través de vegetación natural o plantada, como árboles, arbustos o pastizales, en áreas rurales o forestales, y que puede representar un riesgo para la vida humana, la biodiversidad, la propiedad y el medio ambiente (Salcedo, 2021).

2.3.5. Comportamiento del fuego

Es el conjunto de características y procesos que determinan cómo se inicia, se desarrolla y se propaga un incendio en un entorno natural, influido por factores como el tipo de combustible vegetal, las condiciones meteorológicas y la topografía del terreno (Salcedo, 2021).

2.3.6. Combustible

Material vegetal, como hojas, ramas o troncos, capaz de incendiarse y sustentar un fuego. Los combustibles se categorizan por su dimensión (pequeños o grandes), su condición (fresco o seco), y su contenido de humedad, lo cual influye en su capacidad para quemarse (Añamuro, 2019).

2.3.7. Cortafuegos

Obstáculos naturales o contruidos que se crean con el propósito de frenar el progreso del fuego, removiendo el material inflamable de una zona determinada. Estos pueden incluir senderos, cursos de agua, o áreas de terreno sin vegetación (Aliaga, 2021).

2.3.8. Variables ambientales

Se refieren a los elementos y condiciones que existen en el medio ambiente y pueden afectar o favorecer a los organismos que se desarrollan en cualquier ecosistema (Aliaga, 2021).

2.3.9. Focos de calor

Son zonas específicas que presentan una elevación anormal de temperatura en la superficie terrestre, detectadas mediante sensores remotos, y que pueden indicar la presencia de incendios forestales u otras fuentes de calor intenso (MINAM, 2017).

2.3.10. Landsat

Es un programa conjunto de observación de la Tierra, desarrollado por la NASA y el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), que opera una serie de satélites diseñados para capturar

imágenes multiespectrales de la superficie terrestre con resolución moderada, utilizadas para el monitoreo ambiental, la gestión de recursos naturales y diversas aplicaciones científicas (Añamuro, 2019).

2.3.11. Índice espectral

Es un valor numérico calculado a partir de combinaciones matemáticas entre distintas bandas espectrales captadas por sensores remotos, utilizado para resaltar o analizar características específicas de la superficie terrestre, como la vegetación, el agua, la nieve o el suelo (Comisión Nacional de Actividades Espaciales [CONAE], 2016).

2.3.12. Índice de Calcinación Normalizada (NBR)

Es un índice espectral derivado del análisis de imágenes satelitales, calculado a partir de las bandas del infrarrojo cercano (NIR) y del infrarrojo de onda corta (SWIR), diseñado para identificar áreas afectadas por incendios forestales y evaluar la severidad del daño a la vegetación (Marin, 2022).

2.3.13. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

Es un índice espectral obtenido a partir de imágenes satelitales, calculado mediante la diferencia entre las bandas del infrarrojo cercano (NIR) y el rojo (RED), que permite estimar la densidad y el estado de salud de la vegetación en una determinada área (Marin, 2022).

2.3.14. Modelamiento predictivo

Es una técnica utilizada en el análisis ambiental y la teledetección que, mediante el uso de datos históricos, imágenes satelitales y algoritmos computacionales, permite anticipar el comportamiento de fenómenos naturales, como la propagación de incendios forestales o la degradación de la cobertura vegetal (Carrillo *et al.*, 2012).

2.4. Hipótesis

Hipótesis nula (H0): El modelo predictivo desarrollado mediante el uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y análisis de factores ambientales no es capaz de identificar áreas propensas a incendios forestales en la provincia de Chota.

Hipótesis alternativa (H1): El modelo predictivo desarrollado mediante el uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y análisis de factores ambientales si es capaz de identificar áreas propensas a incendios forestales en la provincia de Chota.

2.5. Operacionalización de variables

Tabla 1

Operacionalización de variables

Variables	Definición conceptual	Dimensiones	Indicadores	Técnicas e instrumentos
Dependiente Áreas propensas a incendios forestales en la provincia de Chota	Zonas geográficas con mayor probabilidad de sufrir incendios forestales debido a factores ambientales y humanos.	Zonas de riesgo	Clasificación de áreas: valor de 0 indica cero probabilidades y 1 representa el 100% de probabilidad.	Modelo predictivo SIG Software ArcGIS NBR NDVI
Independiente Factores ambientales	Elementos del entorno que afectan a los seres vivos y los ecosistemas; Estos factores influyen en el crecimiento, desarrollo y supervivencia de los organismos y ecosistemas.	Topografía, cobertura vegetal, clima, uso del suelo	Temperatura C° Precipitación mm Pendiente (%) Cobertura vegetal Focos de calor	Mapas temáticos Imágenes satelitales

CAPÍTULO III.

MARCO METODOLÓGICO

3.1. Tipo y nivel de investigación

Esta investigación se desarrolló con un enfoque cuantitativo, donde la compilación de la información sirvió para contrastar hipótesis formuladas en el análisis cartográfico, donde permitió determinar la relación que existe entre las variables independientes y dependientes (Hernández y Mendoza, 2018). Las imágenes satelitales y los datos ambientales se emplearon para realizar un análisis detallado y la cartografía correspondiente, con el objetivo de desarrollar un modelo predictivo de incendios forestales.

Este estudio de investigación es de un nivel descriptivo, ya que el propósito es generar el modelo predictivo de incendios forestales, con el fin de identificar las áreas probables, además de analizar las variables ambientales en el contexto natural y precisar la solución al problema (Hernández y Mendoza, 2018).

3.2. Diseño de investigación

Este estudio se llevó a cabo mediante un diseño no experimental, (Hernández y Mendoza, 2018), en el cual no se manipularon las variables de interés. Estas fueron observadas y utilizadas como técnicas e instrumentos de recolección de datos, que posteriormente fueron sometidos a análisis.

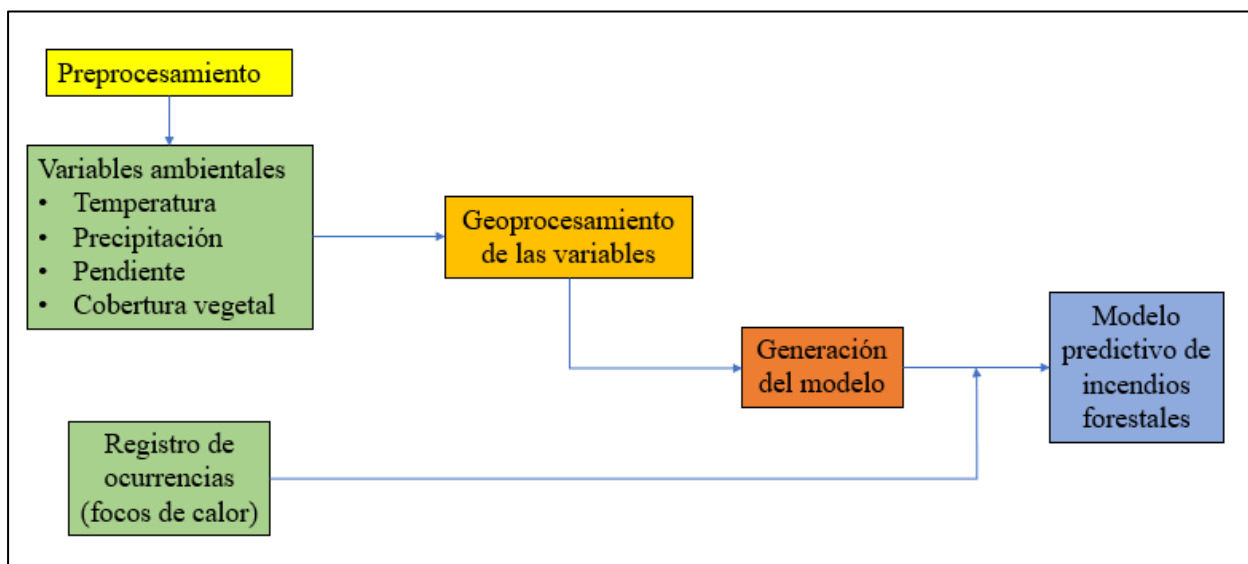
3.3. Métodos de investigación

La construcción de un modelo predictivo de incendios forestales mediante los SIG sobre la cobertura vegetal, conlleva a plantear una guía la cual considera la influencia de las variables ambientales las cuales son: temperatura, precipitación, pendiente, cobertura vegetal y el registro de ocurrencias (focos de calor); donde se realizó un preprocesamiento de cada variable ambiental en el software ArcGIS, donde posteriormente se realizó el desarrollo de estas variables con rangos

establecidos que se consideraron indicativos para que se produzca los incendios forestales, además con ayuda de las imágenes satelitales las cuales contienen un cierto número de bandas, que fueron utilizadas en la construcción e identificación de los índices espectrales, los cuales ayudaron a georreferenciar las áreas probables a estos eventos.

Figura 2

Metodología de la investigación



3.4. Población, muestra y muestreo

Población

La población estuvo delimitada por una superficie total 3 795,10 km² correspondiente a la provincia de Chota.

Muestra

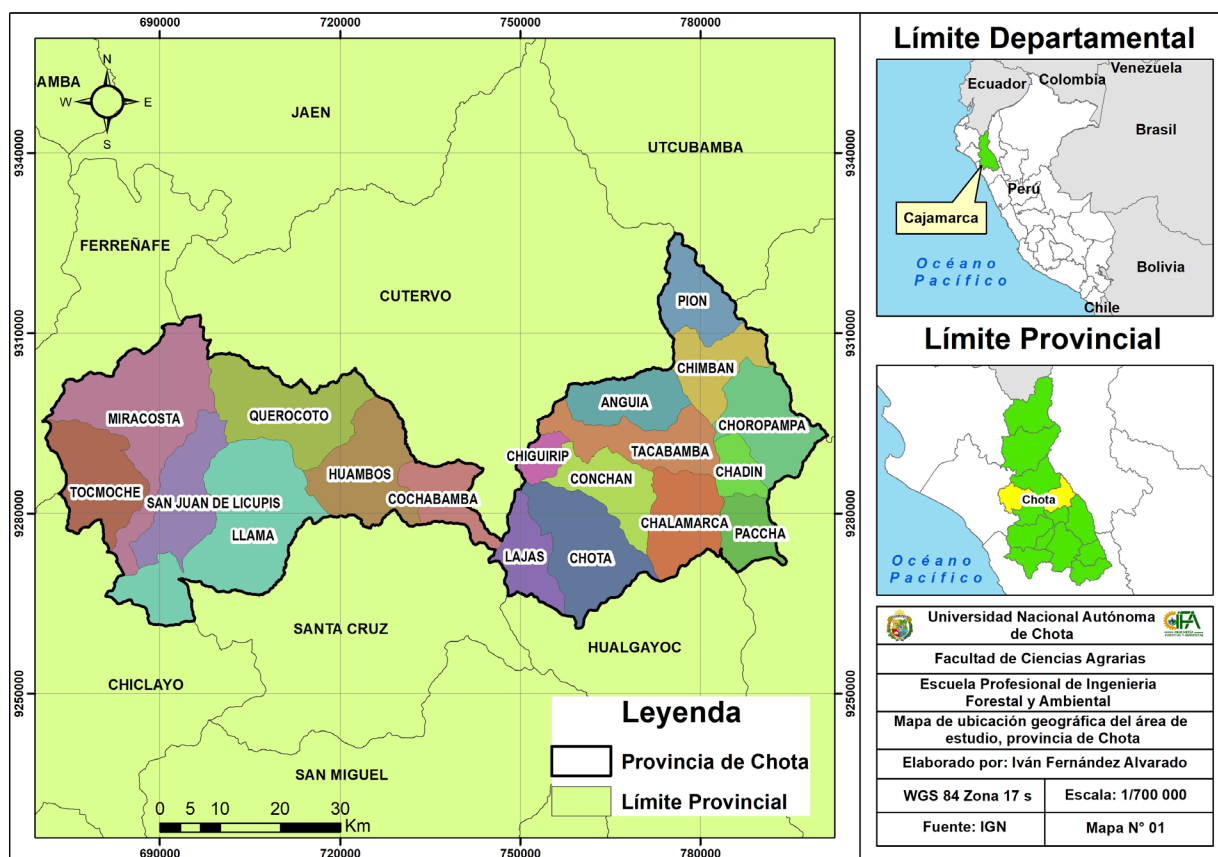
La muestra estuvo representada por las áreas identificadas como propensas a incendios forestales dentro de la provincia de Chota, las cuales fueron delimitadas a partir del análisis y modelamiento geoespacial de las variables de estudio (precipitación, temperatura, pendiente y cobertura vegetal), complementadas con el uso de focos de calor.

Muestreo

La investigación se desarrolló bajo un muestreo no probabilístico de tipo intencional, dado que la elección de las variables de estudio respondió al criterio técnico del investigador y a la revisión de antecedentes científicos. Los geoprocесamientos realizados siguieron procedimientos definidos y fundamentados metodológicamente, lo que permitió la delimitación explícita de las áreas con mayor probabilidad de incendios forestales.

Figura 3

Ubicación y localización del área de estudio



3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

3.5.1. Técnicas de recolección de datos

Las variables ambientales, se obtuvieron de la página web WorldClim (<https://www.worldclim.org/>), así como también los datos fisiográficos fueron obtenidos del modelo digital de elevación Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) y las imágenes satelitales Landsat 9, que fueron adquiridos del sitio web del USGS (<https://earthexplorer.usgs.gov/>), la cobertura vegetal fueron descargados del GEOSERVIDOR y del Ministerio del Ambiente (MINAM) (<https://geoservidor.minam.gob.pe/>), así como también de la MAPOTECA VIRTUAL del Gobierno Regional de Cajamarca Zonificación Ecológica y Económica (ZEE) (<https://zeeot.regioncajamarca.gob.pe/>), los límites del área de estudio fueron obtenidos del Instituto Geográfico Nacional (IGN) (<https://www.gob.pe/ign>).

Los datos de ocurrencias de incendios forestales (focos de calor), se obtuvieron del sitio web Programa Queimadas do INPE Brasil (Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación), (<http://terrabrasilis.dpi.inpe.br/queimadas/portal/>), el cual sirvió para la identificación de áreas probables a incendios forestales.

3.5.2. Instrumentos de recolección de datos

Imágenes satelitales: Landsat 9, usadas para analizar cobertura vegetal e identificar áreas afectadas mediante índices espectrales (NDVI, NBR).

Base de datos climáticos: Información de precipitación y temperatura de la página de WorldClim

Base de datos fisiográficos: Modelo Digital de Elevación (SRTM) para generar variables de altitud y pendiente.

Base de datos cartográficos: Mapas temáticos de uso de suelo, cobertura vegetal y límites administrativos.

Repositorios institucionales: Información de CENEPRED, SERFOR, INEI y SENAMHI sobre registros históricos y reportes técnicos de incendios.

3.6. Técnicas de procesamiento y análisis de datos

3.6.1. Técnicas de procesamiento de datos

A. Fase de gabinete

En esta etapa de la investigación, fueron utilizadas las capas vectoriales y raster, en el software ArcGIS, con el cual se realizó todo el procedimiento.

El presente estudio tuvo una fase de preprocesamiento, donde se analizaron las imágenes raster, estas variables ambientales que fueron descargadas de diferentes sitios web, las cuales necesitaron un ajuste y recorte de acuerdo al área de estudio seleccionada, esto con el fin de agilizar el proceso y que no perjudique al momento de trabajar con las variables.

Los datos de presencia de incendios forestales (focos de calor), que también necesitaron un ajuste y recorte de acuerdo al área seleccionada tuvieron un preprocesamiento, con el fin de mejorar el modelado predictivo de incendios forestales.

El procesamiento de los datos implicó la realización del modelo predictivo de incendios forestales en la provincia de Chota, para ello a las variables ambientales como: precipitación, temperatura, pendiente, cobertura vegetal y focos de calor; a las cuales se les dio condiciones numéricas que se ajusten al modelado predictivo y de acuerdo al área de estudio.

También, con las imágenes satelitales Landsat 9, se realizó el proceso para la obtención de los índices espectrales como NBR y NDVI, con el fin de obtener las áreas potenciales a incendios forestales.

El modelo predictivo de incendios forestales fue generado en formato raster, donde cada celda representa un valor de probabilidad de ocurrencia. Dichos valores se expresan en una escala

continua de 0 a 1, en la cual 0 indica nula probabilidad y 1 corresponde a la máxima probabilidad de ocurrencia de incendios forestales.

B. Fase de campo

En esta sección, se presentaron los resultados ya procesados, los cuales fueron evidenciados mediante mapas que mostraron el modelamiento predictivo de incendios forestales y las áreas potencialmente afectadas. Para corroborar los resultados obtenidos en la fase de gabinete, se realizaron salidas de campo con el propósito de verificar si en las áreas identificadas en los mapas ha ocurrido algún incendio forestal. Esta verificación se llevó a cabo mediante la toma de fotografías y la realización de preguntas simples a los pobladores de las zonas aledañas.

3.6.2. Análisis de datos

Los análisis del modelo predictivo de incendios forestales, se realizaron mediante los cálculos de valor en la interfaz de ArcGIS, el cual nos arrojó el modelo, también se evidenciaron los gráficos de análisis de cada variable que se empleó en el modelado.

Todos los valores del modelo predictivo de incendios forestales fueron clasificados en rangos, los cuales nos permitió clasificar las áreas con probabilidad de incendios, con el fin de realizar programas de reforestación con especies del lugar de estudio, a través de diferentes instituciones públicas y privadas.

3.7. Aspectos éticos

La presente investigación no generó ningún conflicto de interés. La información utilizada fue recopilada exclusivamente de sitios web oficiales, tanto nacionales como internacionales, cuya función es proporcionar datos verídicos y confiables. Los datos recolectados se emplearon únicamente para los fines de esta investigación. Finalmente, los resultados obtenidos serán publicados en la página web de la Universidad Nacional Autónoma de Chota.

CAPÍTULO IV.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

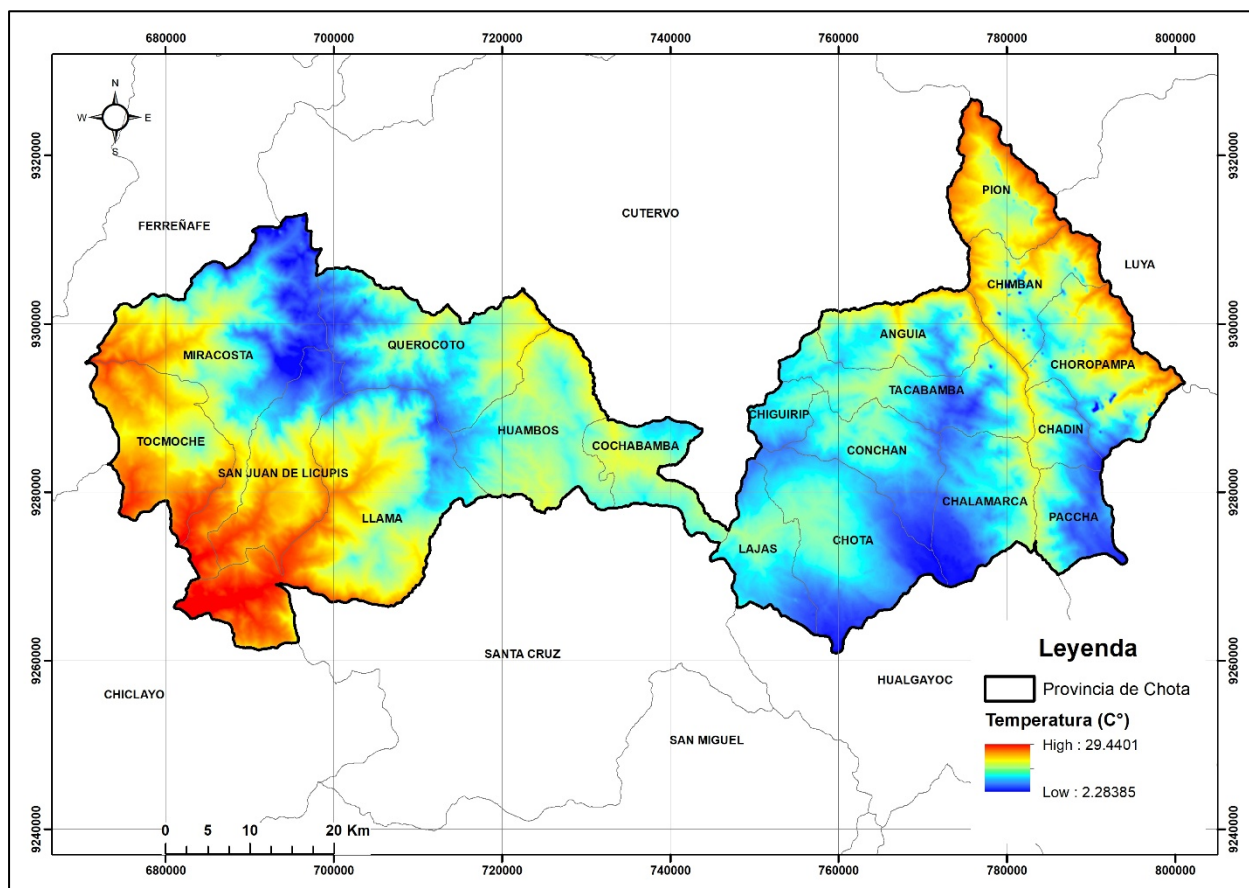
4.1. Descripción de resultados

4.1.1. Descripción de variables de estudio

Una vez obtenido y realizado el preprocesamiento a cada una de las variables de estudio, se procedió a representar cada capa según su naturaleza, que posterior a ellos se realizó y aplicó los criterios de condición para obtener el modelo predictivo de incendios forestales en la provincia de Chota.

❖ Variable temperatura

La distribución espacial de la temperatura en la provincia de Chota muestra valores que oscilan entre 2 °C y 29 °C, evidenciándose zonas más cálidas en los valles interandinos y áreas bajas, mientras que en las partes altas predominan temperaturas frías; este factor ambiental resulta determinante en la ocurrencia de incendios forestales, ya que el incremento térmico favorece la pérdida de humedad del suelo y la vegetación, aumentando la inflamabilidad del material combustible; diversos estudios señalan que el riesgo de combustión en vegetación seca se incrementa cuando la temperatura ambiental supera los 30 °C, intensificándose por encima de los 35 °C (Carrillo, 2022). Si bien en la provincia de Chota las temperaturas registradas alcanzan hasta 29 °C, estas pueden combinarse con sequías locales y déficit hídrico, generando un escenario favorable para la ignición y propagación del fuego, tal como se aprecia en la figura 4.

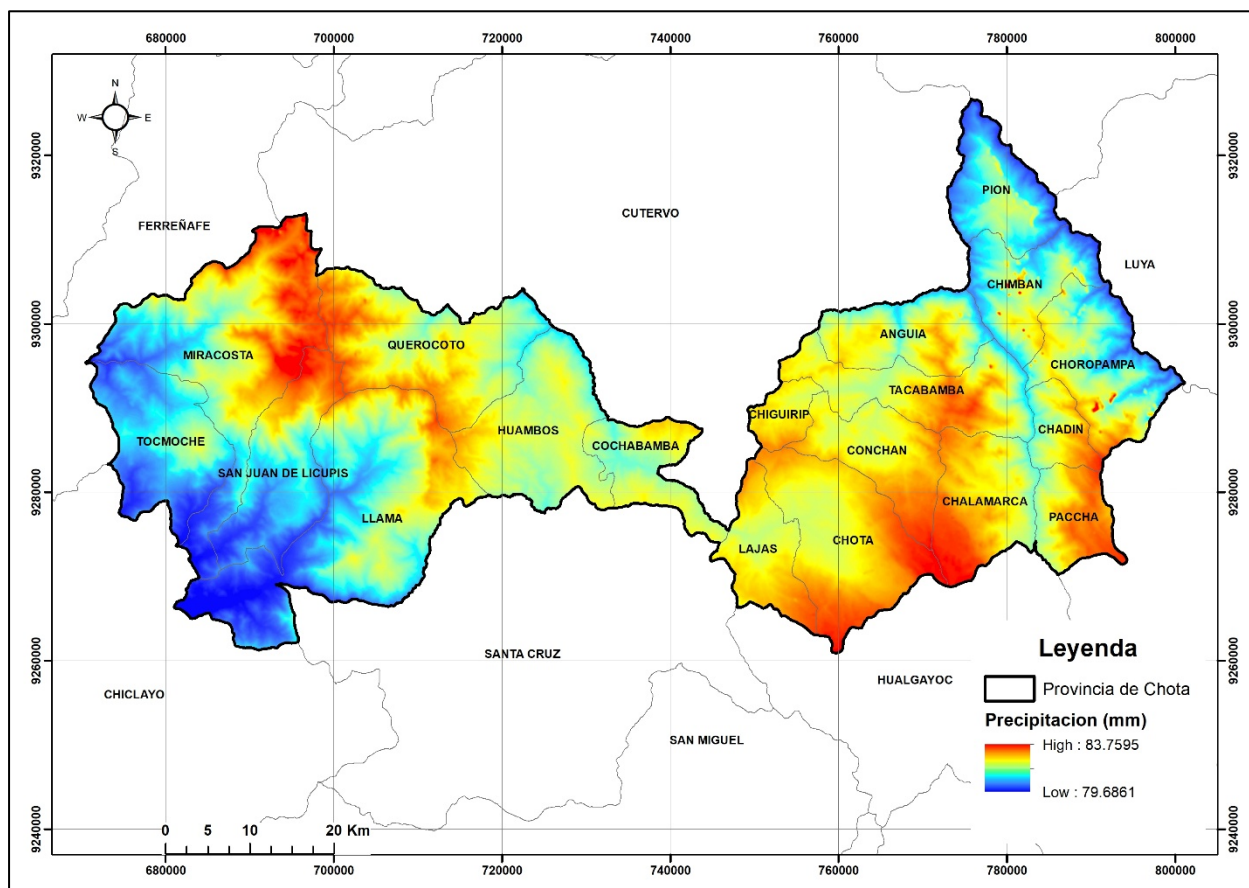
Figura 4*Variable temperatura del área de estudio*

❖ Variable precipitación

La distribución de la precipitación en la provincia de Chota varía entre 79 y 83 mm, mostrando sectores con mayor disponibilidad hídrica y otros con déficit relativo. Esta variación resulta clave para comprender la ocurrencia de incendios forestales, ya que en las zonas con baja precipitación la vegetación tiende a secarse más rápidamente, aumentando su inflamabilidad, mientras que en áreas con mayor precipitación se mantiene mayor humedad, lo que reduce el riesgo. Esta relación entre la cantidad de lluvia y el peligro de incendios queda representada en la figura 5.

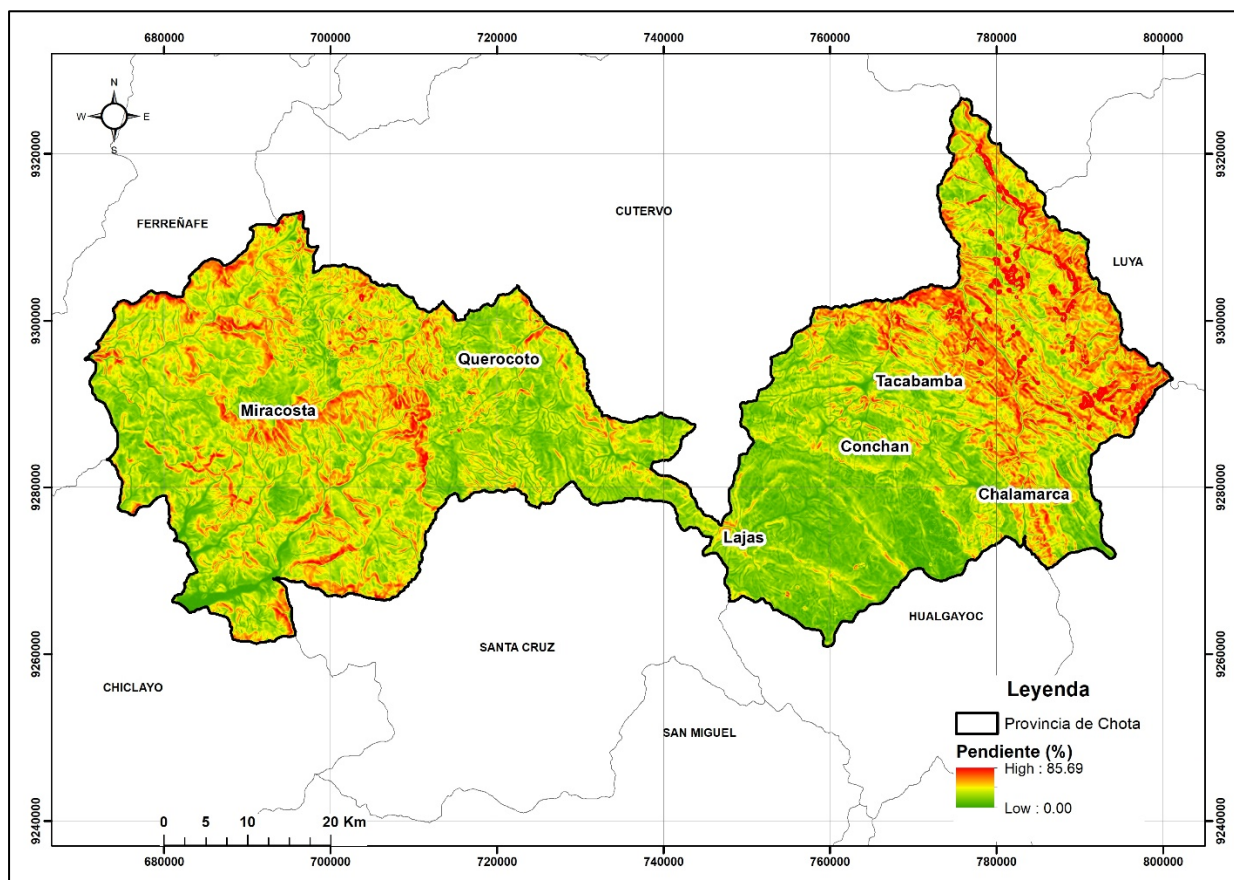
Figura 5

Variable precipitación del área de estudio



❖ Variable pendiente

La variable pendiente, expresada en porcentaje, presenta valores que van desde 0% hasta más del 85%, diferenciándose claramente sectores de relieve plano, moderado y escarpado. En la cartografía, los tonos verdes representan pendientes bajas, mientras que los tonos rojizos indican pendientes muy pronunciadas. Este factor es determinante en la dinámica de los incendios forestales, ya que en áreas con mayor inclinación la propagación del fuego suele ser más rápida debido a la acumulación de material seco y la acción de las corrientes de aire asociadas al relieve. Esta distribución del relieve se observa en la figura 6.

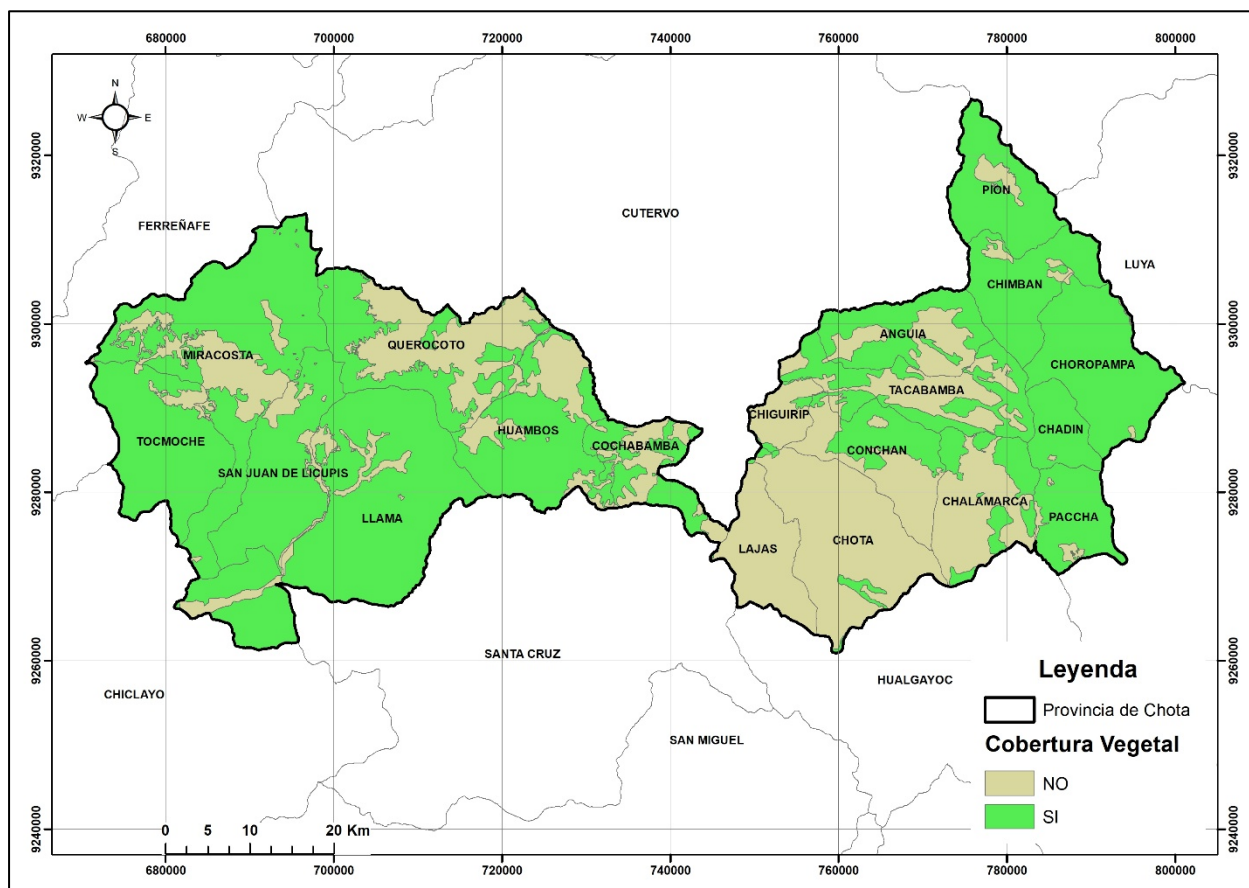
Figura 6*Variable pendiente del área de estudio*

❖ Variable cobertura vegetal

La cobertura vegetal en la provincia de Chota fue clasificada en dos categorías principales: “NO”, que hace referencia a zonas sin una cobertura densa, predominando áreas de pastizales, cultivos agrícolas y otros usos que no constituyen un factor determinante en la ocurrencia de incendios; y “SI”, que corresponde a sectores con abundante vegetación natural, los cuales presentan mayor susceptibilidad a la propagación del fuego debido a la disponibilidad de material combustible. Esta diferenciación espacial se representa en la figura 7.

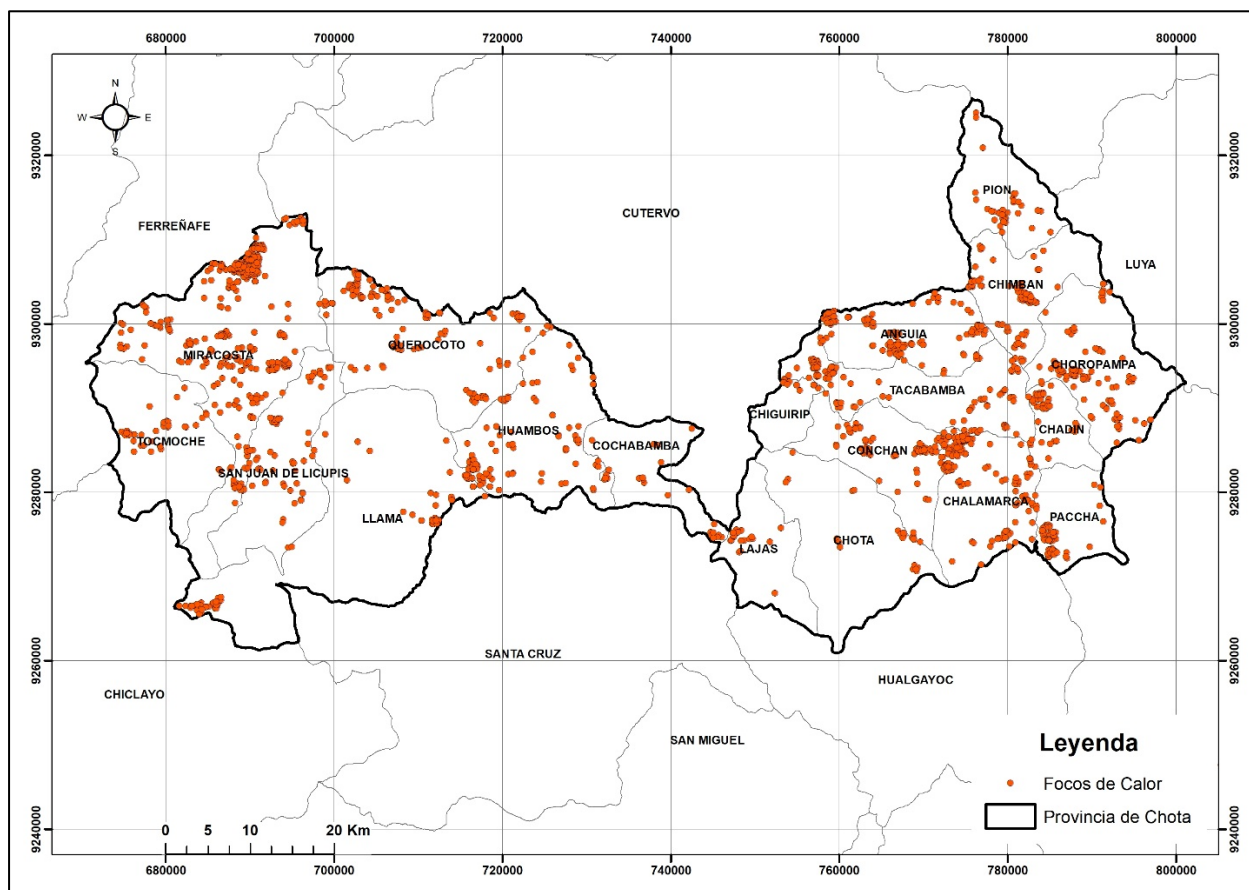
Figura 7

Variable cobertura vegetal del área de estudio



❖ **Variable focos de calor**

Los focos de calor correspondientes al año 2024 fueron descargados del portal Programa Quemadas del INPE (Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación de Brasil). Estos puntos constituyen registros satelitales que indican posibles focos de incendio forestal, funcionando como un sistema de alerta temprana que permite identificar y prevenir eventos de esta naturaleza en el área de estudio. La distribución espacial de dichos focos se presenta en la figura 8.

Figura 8*Variable focos de calor del área de estudio*

4.1.2. Aplicación de criterios de condición a cada variable de estudio

En este apartado se detalla cada proceso y criterios de restricción que se aplicaron a cada variable de estudio con el fin de poder evidenciar áreas donde se puede dar un incendio forestal, además que estas restricciones se aplicaron según las capas obtenidas y el área de estudio.

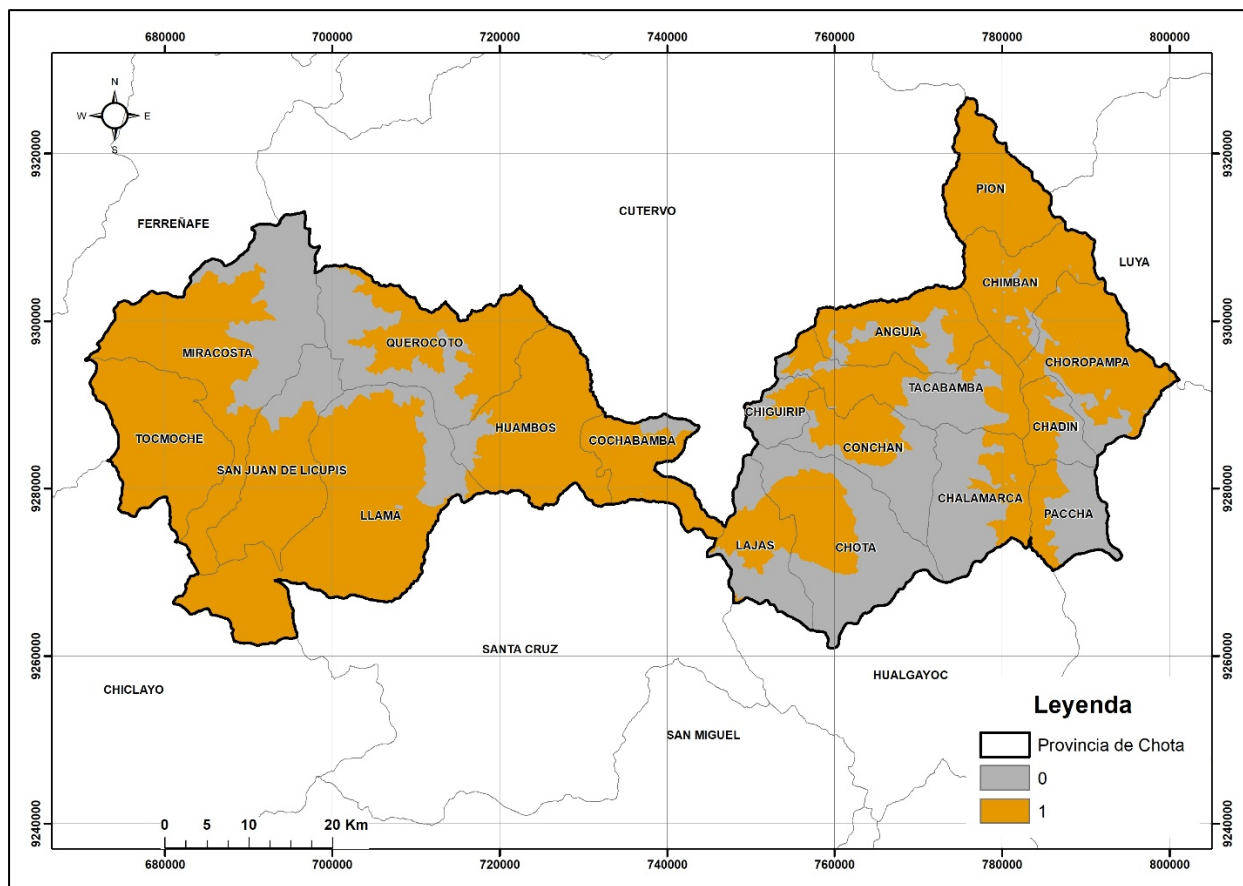
❖ Variable temperatura

El análisis de la variable temperatura permitió establecer un criterio de condición para identificar zonas con mayor riesgo de incendio. En este caso, se asignó el valor 0 (gris) a las áreas donde no existirían condiciones para que ocurra un incendio forestal y el valor 1 (naranja) a las zonas propensas. Para la clasificación se consideró que temperaturas mayores a 15 °C representan un

factor determinante para la ocurrencia de incendios, utilizando la herramienta “Raster Calculator”, lo cual se refleja en la figura 9.

Figura 9

Distribución espacial de la variable temperatura ($>15\text{ }^{\circ}\text{C}$) como condición para incendios forestal en el área de estudio



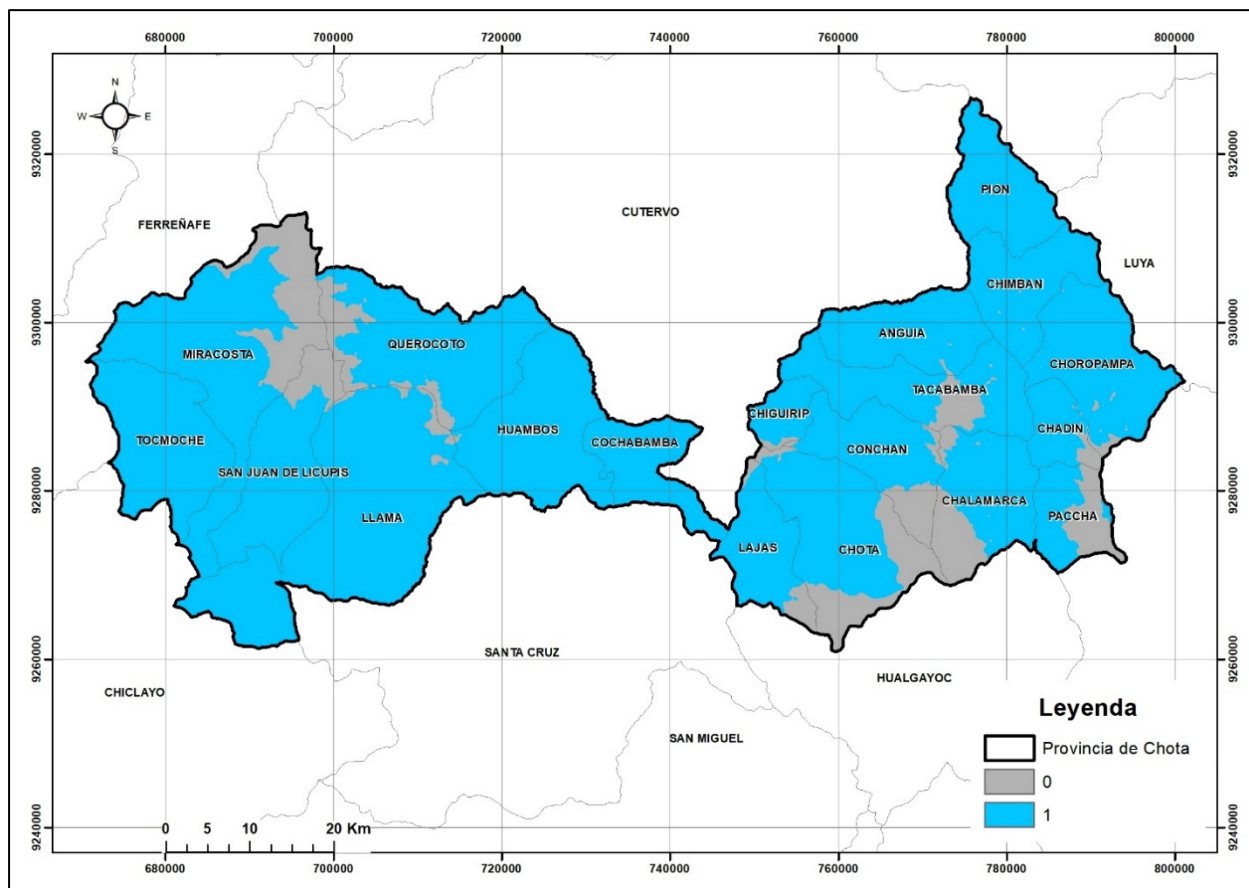
❖ Variable precipitación

El análisis de la variable precipitación permitió clasificar el territorio en dos categorías: el valor 0 (gris) representa las áreas donde no existirían condiciones para el desarrollo de incendios forestales, mientras que el valor 1 (celeste) identifica las zonas con mayor probabilidad de ocurrencia. Para este caso, se aplicó como criterio de restricción que valores de precipitación

iguales a 81 mm anuales son propicios para la presencia de incendios forestales, utilizando la herramienta “Raster Calculator”, lo cual se refleja en la figura 10.

Figura 10

Distribución espacial de la variable precipitación (81 mm) como condición para incendios forestal en el área de estudio

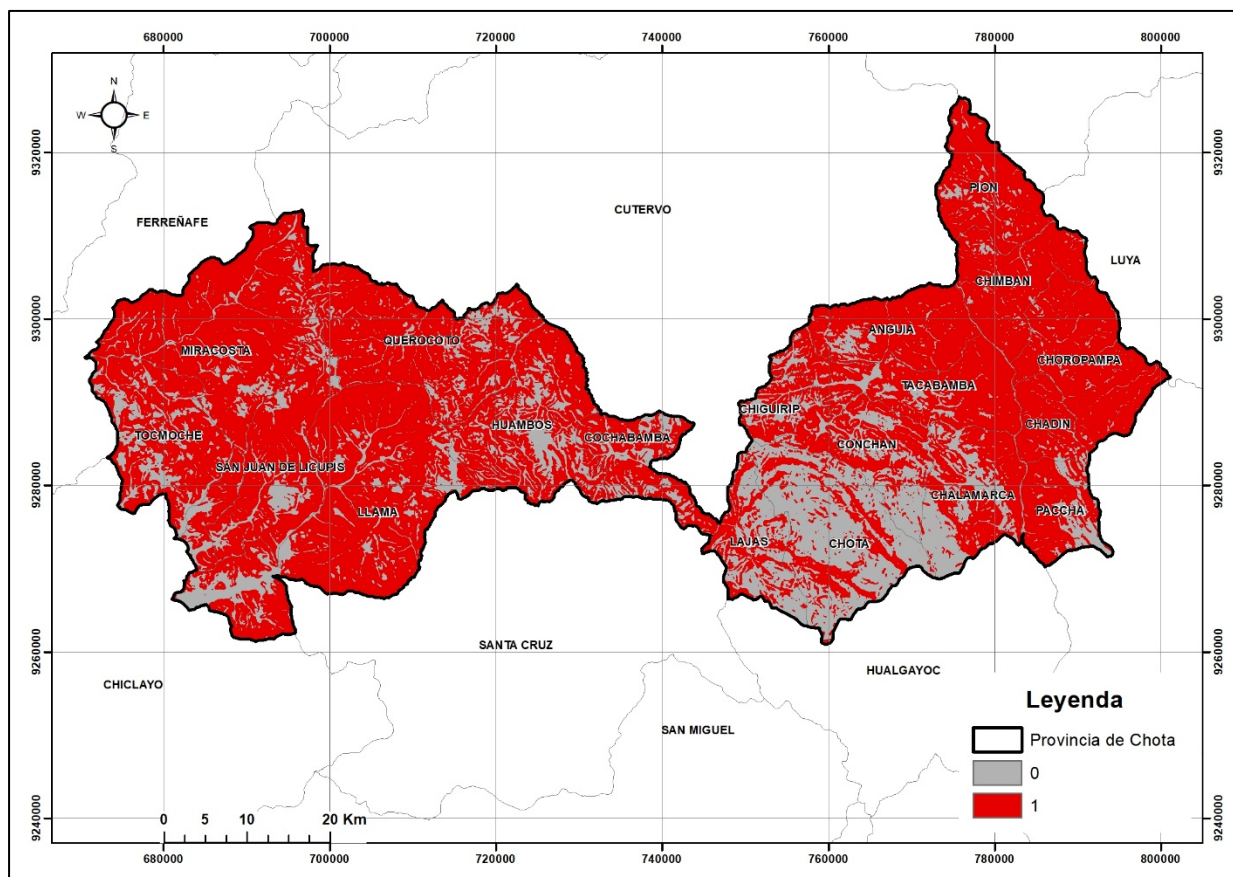


❖ Variable pendiente

El procesamiento de la variable pendiente permitió identificar dos categorías: el valor 0 representa las áreas sin condiciones para la ocurrencia de incendios forestales, mientras que el valor 1 corresponde a las zonas con mayor probabilidad de incidencia. En este caso, se aplicó como criterio de restricción que pendientes superiores al 20% son consideradas propicias para la propagación de incendios, utilizando la herramienta “Raster Calculator”, tal como se aprecia en la figura 11.

Figura 11

Distribución espacial de la variable pendiente (>20 %) como condición para incendios forestal en el área de estudio

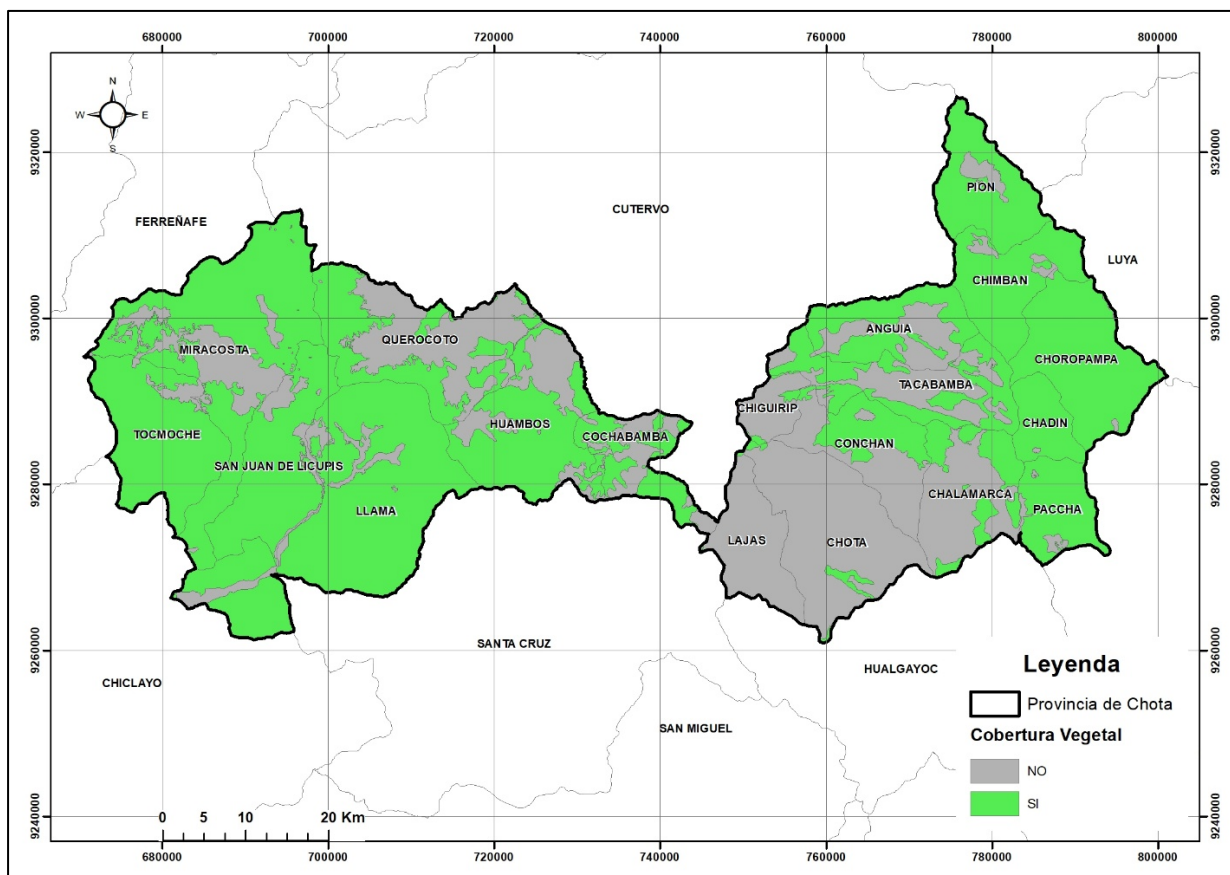


❖ Variable cobertura vegetal

Se presentan dos valores donde el NO corresponde a áreas sin riesgo de incendio forestal, en tanto que el SI corresponde a zonas con incidencia de este fenómeno. Para esta variable, partiendo de los datos ya restringidos, se aplicó la herramienta de geoprocésamiento Dissolve, que permitió unificar atributos como suelos desnudos, ríos, lagos, bosques, entre otros, clasificándolos finalmente en dos categorías, tal como se muestra en la figura 12.

Figura 12

Distribución espacial de la variable cobertura vegetal (SI/NO) como condición para incendios forestal en el área de estudio



4.1.3. Generación de modelos predictivos de incendios forestales

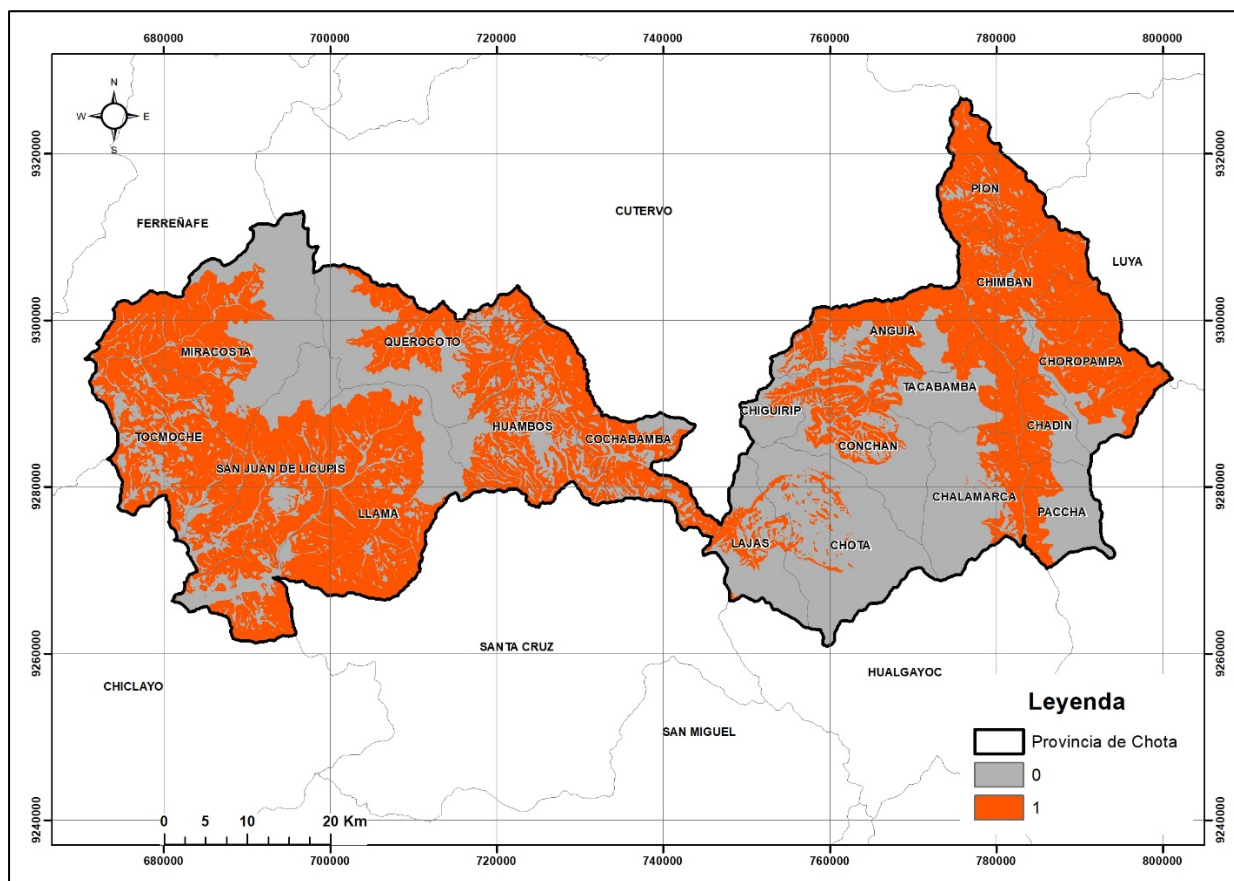
En este apartado se presentan los resultados de la multiplicación de las cuatro variables de estudio (temperatura, precipitación, pendiente y cobertura vegetal), a partir de lo cual se generaron dos modelos predictivos. El Modelo 01 considera únicamente estas variables para identificar áreas con condiciones propicias a incendios forestales, mientras que el Modelo 02 incorpora además los focos de calor, lo que permite delimitar con mayor precisión las zonas críticas de ocurrencia.

❖ Modelo 01

El resultado de la multiplicación de las cuatro variables de estudio (temperatura, precipitación, pendiente y cobertura vegetal), mediante el uso de la herramienta de análisis espacial Raster Calculator, evidencia dos valores: 0 (gris), que representa las áreas donde no se generaría un incendio, y 1 (naranja), que corresponde a las zonas con condiciones propicias para la ocurrencia de incendios forestales, alcanzando una extensión de 2 048,43 km², donde el 53,97% del área representa como propensa a incendios forestales, como se aprecia en la figura 13.

Figura 13

Modelo 01 de predicción de incendios forestales a partir de la integración de las cuatro variables de estudio en la provincia de Chota

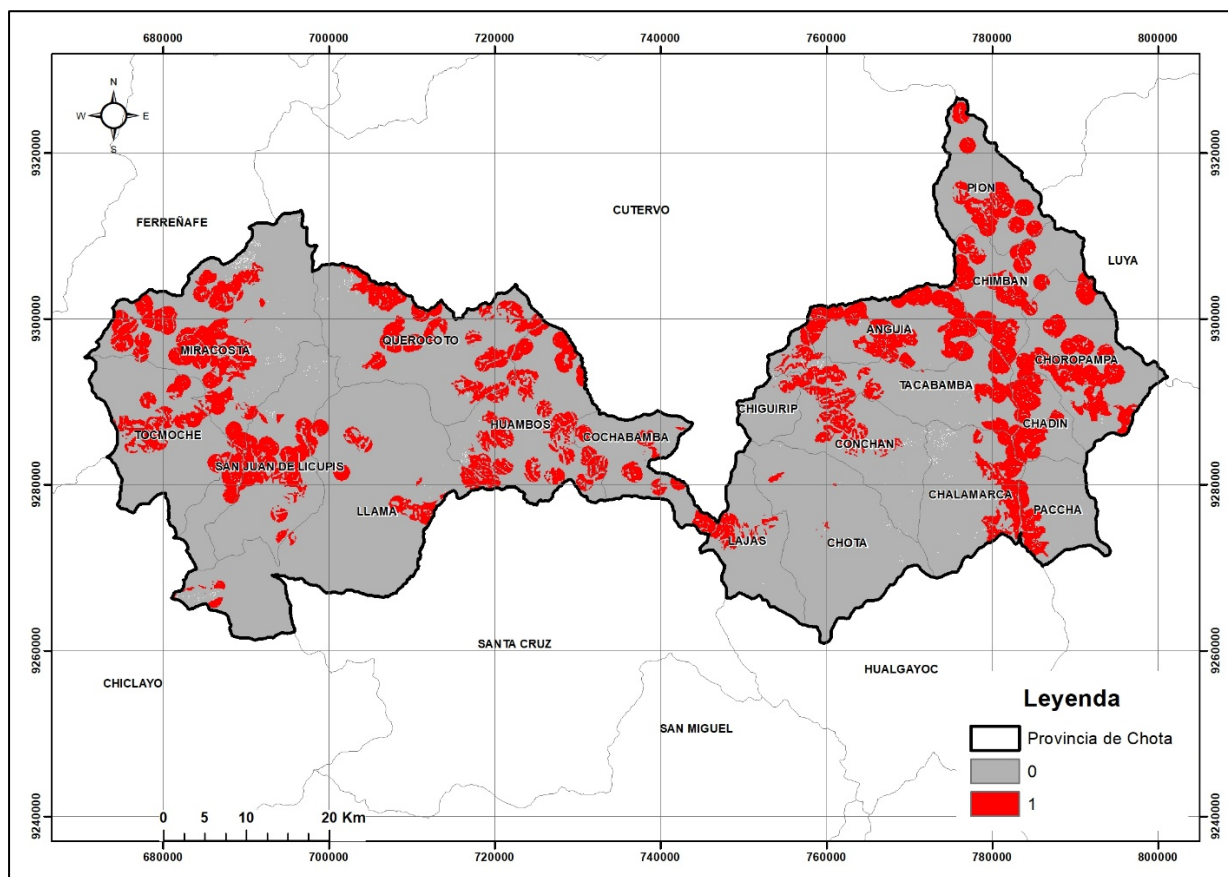


❖ Modelo 02

El resultado de la multiplicación de las cuatro variables de estudio (temperatura, precipitación, pendiente y cobertura vegetal) junto con los focos de calor, mediante la herramienta de análisis espacial Raster Calculator, muestra dos valores: 0 (gris), que representa las áreas donde no se generaría un incendio, y 1 (rojo), que corresponde a las zonas con condiciones críticas y muy propensas a la ocurrencia de incendios forestales, alcanzando una extensión de 777,96 km², donde el 20,49% del área representa como crítica a incendios forestales, como se observa en la figura 14.

Figura 14

Modelo 02 de predicción de incendios forestales a partir de la integración de las cuatro variables de estudio y los focos de calor en la provincia de Chota



4.1.4. Generación del índice de calcinación normalizada (NBR)

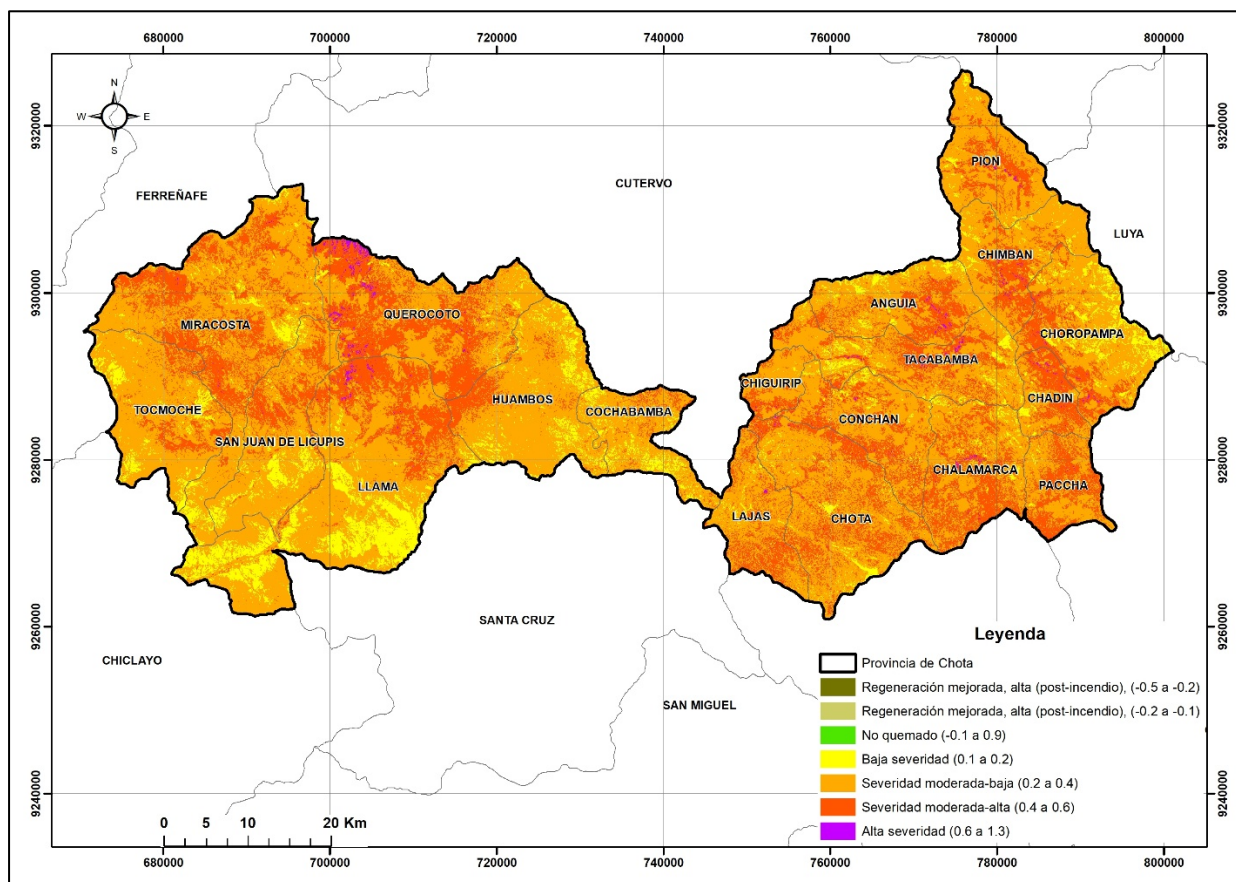
El índice de calcinación normalizada (NBR) constituye uno de los indicadores más utilizados en la teledetección para evaluar la severidad y el impacto de los incendios forestales, ya que permite diferenciar entre áreas con vegetación sana, superficies regeneradas y zonas afectadas por eventos de fuego. Sus valores oscilan entre -1 y 1: los valores negativos reflejan una cobertura vegetal vigorosa, con un alto contenido de clorofila y humedad, propia de ecosistemas en buen estado o en proceso de regeneración post-incendio; mientras que los valores positivos evidencian condiciones críticas como la pérdida de biomasa, sequedad de la vegetación y acumulación de material combustible, lo cual incrementa la susceptibilidad a incendios forestales.

Para su cálculo se empleó una imagen Landsat 9, utilizando las bandas B5 (Infrarrojo Cercano – NIR) y B7 (Infrarrojo de Onda Corta – SWIR), aplicando la fórmula: $(NIR - SWIR) / (NIR + SWIR)$. Esta relación espectral permite resaltar la diferencia entre la reflectancia de la vegetación saludable (alta en NIR) y la vegetación dañada o seca (alta en SWIR), brindando un diagnóstico espacial de la severidad del fuego.

En el resultado obtenido, las áreas representadas en color morado corresponden a zonas con alta severidad de incendios forestales, alcanzando una superficie de 16,95 km² en la provincia de Chota, lo que constituye un indicador clave para la gestión del riesgo y la planificación de estrategias de prevención y restauración, donde el 0,44% se representa como área severamente dañada por incendios forestales, como se observa en la figura 15.

Figura 15

Índice de calcinación normalizada (NBR) en el área de estudio



4.1.5. Generación del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)

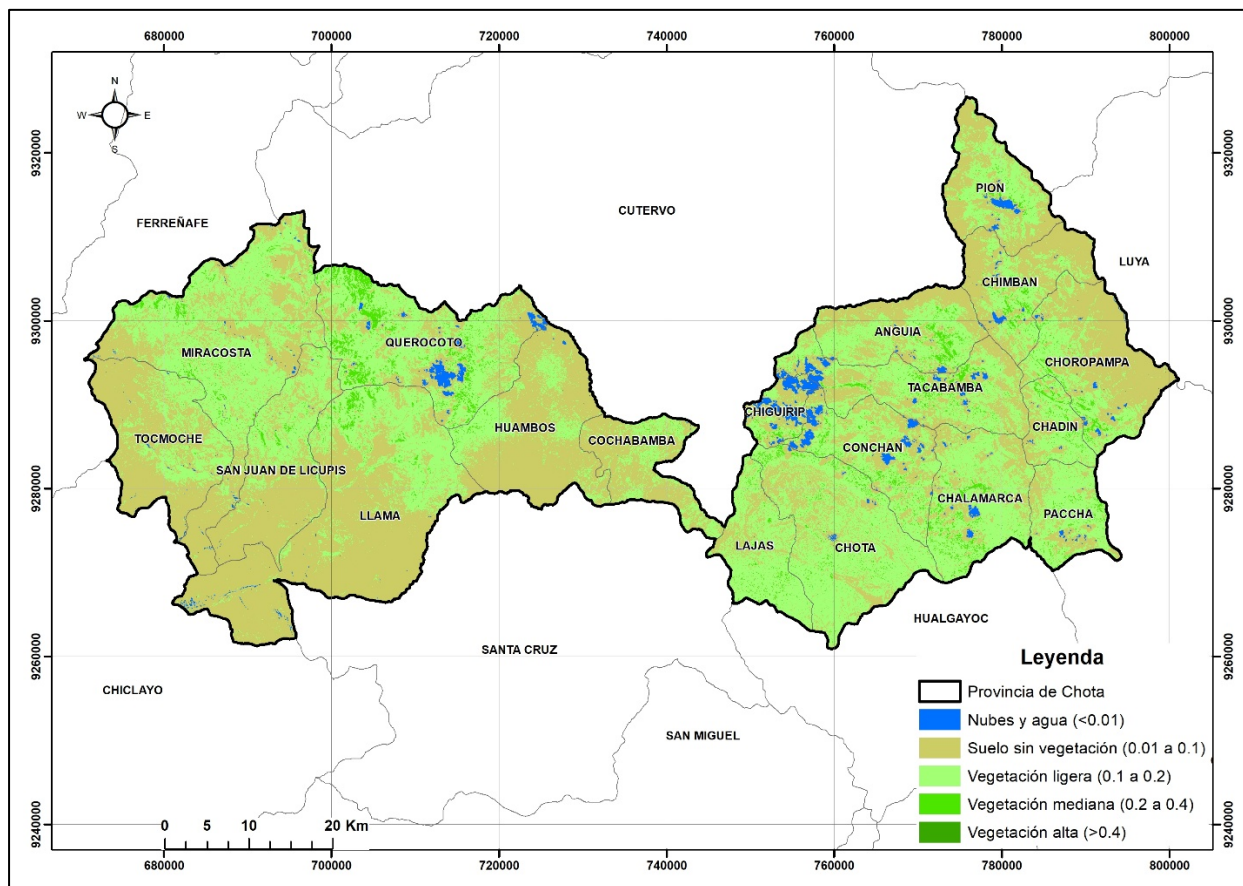
El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) es uno de los indicadores más empleados en teledetección para evaluar la cantidad, vigor y estado de la cobertura vegetal, siendo un parámetro clave en el análisis de la susceptibilidad a incendios forestales. Sus valores oscilan entre -1.0 y 1.0: los valores negativos corresponden principalmente a cuerpos de agua, nubes y nieve; mientras que los valores cercanos a cero se asocian a suelos desnudos, rocas o superficies con escasa cobertura vegetal. Valores intermedios reflejan vegetación ligera o en estado de estrés, y aquellos positivos próximos a 1 representan bosques densos y saludables, característicos de ecosistemas templados o tropicales.

Para el presente análisis se utilizó una imagen satelital Landsat 9, a partir de las bandas B5 (NIR) y B4 (RED), aplicando la fórmula: $(NIR - RED) / (NIR + RED)$. Este cociente permite resaltar las diferencias espectrales entre la reflectancia de la vegetación sana (alta en NIR) y la vegetación degradada o de baja densidad (alta en RED).

En el resultado obtenido, las zonas con verde oscuro representan alta densidad de vegetación, con una extensión de 0,08 km², lo que representa en 0,002% de área con bosque saludable (verde oscuro) en la provincia de Chota. En contraste, las áreas con baja densidad constituyen un factor clave para la generación de incendios forestales, al convertirse en material combustible más susceptible, como se observa en la figura 16.

Figura 16

Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) en el área de estudio

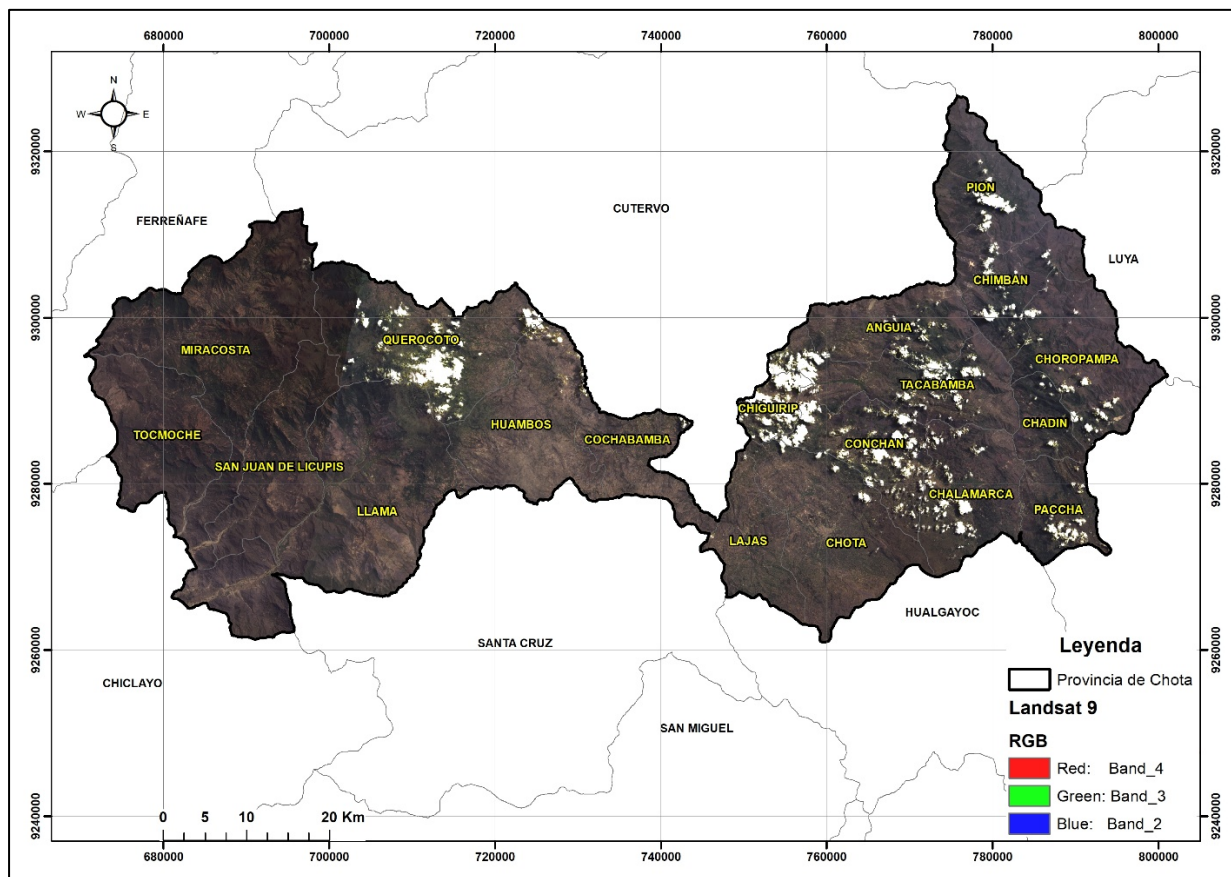


4.1.6. Color natural de la imagen satelital Landsat 9

La imagen satelital Landsat 9 permite obtener una visualización en color natural, empleando la combinación de bandas 4 (rojo), 3 (verde) y 2 (azul), lo que reproduce de manera aproximada la percepción visual del ojo humano. Este tipo de composición facilita la interpretación visual del territorio, ya que permite identificar elementos como centros poblados, cuerpos de agua, áreas agrícolas, zonas de bosque y superficies sin cobertura vegetal. Asimismo, el uso del color natural constituye una base de referencia fundamental para realizar comparaciones con otras composiciones a falso color o con índices espectrales, facilitando así el análisis espacial y la interpretación temática de la provincia de Chota

Figura 17

Color natural de la imagen satelital Landsat 9 de la provincia de Chota

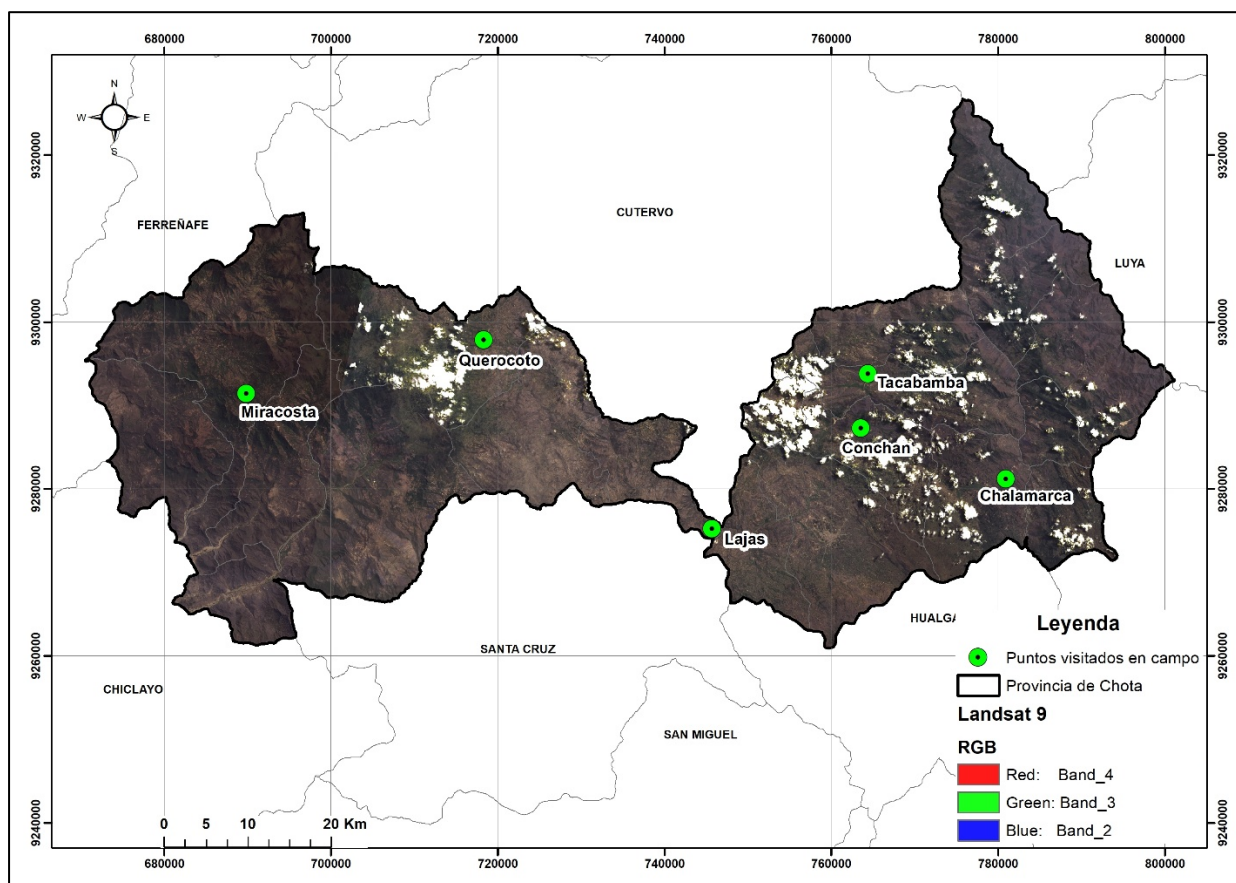


4.1.7. Áreas visitadas en campo del área de estudio

De las áreas identificadas en el modelo 02, se realizaron visitas de campo en seis puntos estratégicos correspondientes a zonas con potencial de incendios forestales o donde previamente se habían producido estos eventos. Estas visitas confirmaron que, aun con el paso del tiempo, es posible identificar evidencias de incendios ocurridos. Las localidades evaluadas fueron Tacabamba, Conchán, Querocoto, Miracosta, Chalarmarca y Lajas, donde se constataron áreas propensas a incendios forestales y otras con antecedentes de afectación. En la figura 18 se muestran los lugares visitados en campo, mientras que en los anexos se adjuntan fotografías que ilustran las condiciones observadas.

Figura 18

Áreas visitadas en campo



4.2. Contrastación de hipótesis

La hipótesis planteada para este estudio fue la siguiente: El modelo predictivo desarrollado mediante el uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y análisis de factores ambientales es capaz de identificar áreas propensas a incendios forestales en la provincia de Chota.

Para contrastar esta hipótesis, se utilizó un enfoque basado en el análisis de las variables ambientales relevantes y en la implementación de modelos predictivos mediante SIG. A través de un proceso detallado de modelización y validación de datos, se identificaron las áreas con mayor probabilidad de ocurrencia de incendios forestales, tomando en cuenta factores como la temperatura, precipitación, pendiente, cobertura vegetal y focos de calor, donde el modelo 01 logró identificar áreas con una extensión de 2 048,43 km² de superficie, en tanto el modelo 02 logró identificar áreas con una extensión de 777,96 km².

Los resultados obtenidos a partir del análisis y la validación del modelo muestran que, efectivamente, las áreas identificadas por el modelo coinciden con las zonas afectadas por incendios forestales identificadas en la fase de campo, lo que refuerza la validez del modelo y la hipótesis planteada. Además, el desempeño del modelo fue evaluado mediante métricas de precisión y exactitud, mostrando una alta capacidad predictiva en la identificación de áreas de alto riesgo.

Por lo tanto, se puede concluir que la hipótesis alternativa, que sostiene que el modelo predictivo desarrollado es capaz de identificar áreas propensas a incendios forestales en la provincia de Chota, es válida. Los resultados obtenidos son consistentes con los objetivos del estudio y demuestran la efectividad de los SIG en la predicción de fenómenos tan complejos como los incendios forestales.

4.3. Discusión de resultados

4.3.1. Descripción de las variables de estudio

En la presente investigación se trabajó con cinco variables de estudio, temperatura, precipitación, pendiente, cobertura vegetal y focos de calor, que fueron suficientes para identificar áreas probables a incendio forestales; en tanto Villar *et al.* (2022), señalan que las variables como la temperatura del trimestre más seco, la velocidad del viento, el índice de vegetación mejorado (EVI) y la ocurrencia del fenómeno de El Niño resultan relevantes para el análisis. No obstante, es crucial reconocer las limitaciones de estos factores, ya que la temperatura, aunque correlacionada con la sequedad de la vegetación, no es suficiente por sí sola para predecir los incendios, sin considerar influencias locales como la gestión del suelo. La velocidad del viento, aunque determinante en la propagación de incendios, presenta desafíos en su medición en áreas remotas, y el EVI, a pesar de su utilidad, puede verse afectado por factores como la cobertura nubosa. Además, aunque El Niño claramente influye en la intensidad de las sequías, otros fenómenos climáticos pueden alterar los resultados.

En tanto Casado y Vargas (2025), mencionan que la variable pendiente pronunciada facilita la propagación del fuego y las áreas más planas contribuyen a la acumulación de combustible, además que la cobertura vegetal y los pastizales exacerbaban la severidad y propagación y que están muy relacionados con la limpieza del territorio ocasionando que sea más susceptible a incendios forestales, en cambio para Travieso y Soto (2024), quienes trabajaron con las variables de precipitación, temperatura y altitud, llegando a determinar que en épocas de sequía la temperatura llega a ser un factor determinante y que podría estar propiciando a incendios forestales.

La investigación aborda variables clave como temperatura, precipitación, pendiente, cobertura vegetal y focos de calor, alineándose en parte con los estudios previos de Villar *et al.* (2022), Casado y Vargas (2025), y Travieso y Soto (2024), que también resaltan factores climáticos y geográficos como la temperatura, pendiente y vegetación. Sin embargo, los estudios revisados destacan limitaciones en el uso aislado de estas variables, sugiriendo que factores adicionales, como la gestión del suelo y fenómenos climáticos, deben ser considerados. La crítica principal radica en la falta de una integración más profunda entre estos elementos, lo que podría mejorar la precisión de la predicción de incendios forestales.

4.3.2. Aplicación de criterios de condición a cada variable de estudio

En la presente investigación se aplicaron condiciones a cada variable de estudio, con el fin de estandarizar y facilitar la identificación de áreas propensas a incendios forestales, para temperatura > 15 °C, precipitación valores iguales a 81 mm anuales, pendiente $> 20\%$, cobertura vegetal dividida en SI donde representa cobertura vegetal y NO donde no representa gran cobertura vegetal, con esto se pudo lograr identificar áreas propensas y que para el presente estudio fueron suficientes; así mismo De Oliveira *et al.* (2024), quienes aplicaron diferentes condiciones de restricción a las variables de estudio y la que mayor relevancia presentó fue la pendiente donde se asignó valores o intervalos que van desde 0-3%, 3-5%, 5-10%, 10-15% y $> 35\%$, considerando que esta variable es la que más influyó, además señalan que en las laderas más inclinadas hay mayor probabilidad de que el fuego se propague, también señalan que la hidrografía del lugar juega un papel muy importante, donde le asignaron un valor de 500 metros de distancia, es decir cuanto más cerca de la red de drenaje, menor es el riesgo de incendios.

Perea (2024), quien trabajó con ocho variables de estudio, destacando el tipo de combustible clasificado en bosques, arbustos, herbáceas y pastos, donde le asignaron valores ponderados de 1,

2, 3 y 4, donde esta variable representa un nivel de peligro alto y es propensa a que se generen incendios forestales; también se destaca la pendiente clasificada en valores $>55\%$, $30-54\%$, $6-30\%$ y 15% , donde le asignaron valores ponderados de 4, 3, 2 y 1, esta variable representa un alto valor de que se produzca un incendio forestal y está asociado con las zonas de preservación y conservación, además menciona que las variables utilizadas son medidas de prevención y que ayudan a identificar áreas propensas a incendios forestales.

La investigación actual y los estudios De Oliveira *et al.* (2024) y Perea (2024) coinciden en que la pendiente es clave para identificar áreas propensas a incendios forestales. Mientras que el estudio actual y De Oliveira *et al.* destacan la pendiente y la proximidad a la hidrografía, Perea se enfoca en el tipo de combustible y su relación con el riesgo de incendios, asignando valores ponderados a estas variables. Ambos enfoques buscan identificar zonas vulnerables, pero varían en las variables y criterios utilizados para la prevención de incendios.

4.3.3. Generación de modelos predictivos de incendios forestales

En la presente investigación se logró generar dos modelos, el primero se generó con las cuatro variables de estudio, dando como resultado una área de $2\,048,43\text{ km}^2$, este primer modelo sirvió de forma general para la identificación de áreas propensas a incendios forestales, en tanto el segundo modelo, se generó con las cuatro variables de estudio y se incluyó a los focos de calor y dio como resultado una área con una extensión de $777,96\text{ km}^2$, este modelo sirvió para la identificación de áreas potencialmente críticas y propensas a incendios forestales; en tanto Valencia y Maillard (2021), quienes trabajaron con un solo modelado integrando variables climáticas y la que destacó más fue cobertura vegetal, además de utilizar una clasificación supervisada en campo, lograron identificar una superficie de $12,72\text{ km}^2$, que representa áreas

críticas propensas a incendio forestales, destacando que las Áreas Naturales Protegidas están incluidas.

Así mismo, para Uyuni *et al.* (2023), quienes establecieron una metodología con enfoque holístico para la identificación de áreas propensas a incendios forestales mediante modelos predictivos, donde utilizaron variables geográficas, con un criterio de nivel de severidad, también utilizaron la cobertura vegetal afectada por incendios, luego de integrar las variables dio como resultado un modelo con una extensión de 0,82 km² de superficie, representando el 0,3% de los bosques, concluyendo que el modelo sirvió de soporte para la toma de decisiones de cualquier programa de restauración.

Los tres estudios presentan diferentes enfoques para identificar áreas propensas a incendios forestales, y aunque todos comparten el objetivo, varían en el alcance y las variables utilizadas. En la investigación presentada, se crearon dos modelos: uno con cuatro variables y otro que además incluyó focos de calor, obteniendo áreas de 2 048,43 km² y 777,96 km², respectivamente, lo que permitió identificar una gran extensión de zonas de riesgo. Por otro lado, Valencia y Maillard (2021) usaron un modelo con variables climáticas y cobertura vegetal, pero con un área mucho más pequeña de 12,72 km², destacando especialmente las Áreas Naturales Protegidas. Finalmente, Uyuni *et al.* (2023) emplearon un enfoque más detallado con variables geográficas y cobertura afectada por incendios, generando un modelo de solo 0,82 km², aunque útil para la restauración forestal. Así, la diferencia principal radica en el tamaño de las áreas analizadas y el enfoque de cada estudio.

4.3.4. Generación del índice de calcinación normalizada (NBR)

En la presente investigación se generó el índice de calcinación normalizada (NBR) con la división de las bandas de Landsat 9 (NIR y SWIR), donde arrojó valores que van desde -1 a 1, además se logró clasificar en siete clases, la última corresponde a la categoría de alta severidad, con un rango de 0,6 a 1,3, y que permitió identificar una área de 16,95 km² de superficie consideras como áreas críticas y propensas a incendios forestales, en tanto Gonzáles (2022), quien trabajó con las imágenes de Landsat 8 y logró obtener una clasificación de baja hasta alta identificando una superficie de 3,06 km² que representa un 15,77% del total del área de estudio, además evidenció que el índice NBR y los sistemas de información geográfica ayudan en el análisis de la severidad de incendios forestales y su estimación, en tanto Campos (2022), quien trabajó con las imágenes de Sentinel 2, calculada a partir de las bandas 8 y 12, clasificada en niveles que van desde baja hasta alta, con los resultados obtenidos logró identificar que el área de estudio se encuentra en moderada – alta con valores que van desde 0,44 a 0,66, abarcando un total de 28,75 km² de superficie, además de acuerdo al resultado obtenido menciona que la severidad de los incendios forestales en su mayoría corresponden a la clasificación de uso forestal limitado y que cuenta con una menor cantidad de área de protección.

Así mismo O'Hare (2025), quien trabajó con las imágenes de Sentinel 2 para calcular valores de NBR, donde logró clasificar diferentes áreas propensas a incendios forestales y la más representativa que logró identificar es una severidad extrema o alta con una extensión de 81,28 km², resultados que muestran que la selva tropical puede verse afectado por los incendios y también tiene los medios de recuperación pero el tiempo es mayor, además menciona que ante incendios forestales el prioritario después un post - incendio es la recuperación de la vegetación con programas de reforestación.

Los estudios comparados utilizan diferentes imágenes satelitales y metodologías para evaluar la severidad de los incendios forestales. La investigación presentada empleó Landsat 9 para calcular el índice NBR, identificando 16,95 km² de áreas críticas. Gonzáles (2022), con Landsat 8, obtuvo 3,06 km² y destacó el uso del NBR y SIG en el análisis. Campos (2022), con imágenes de Sentinel 2, clasificó 28,75 km² con severidad moderada-alta, centrado en áreas de uso forestal limitado. O'Hare (2025), también con Sentinel 2, detectó 81,28 km² con severidad extrema, enfocándose en la recuperación de la selva tropical post-incendio. Todos coinciden en la utilidad del NBR para evaluar la severidad de los incendios. El uso de imágenes satelitales es beneficioso porque permite analizar grandes áreas y con alta frecuencia temporal, pero también tiene limitaciones. La resolución y calidad de las imágenes pueden verse afectadas por factores como la cobertura de nubes, aunque las imágenes satelitales son herramientas valiosas, no deben sustituir los análisis de campo, que son esenciales para obtener una evaluación más precisa y contextualizada.

4.3.5. Generación del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)

En la presente investigación se generó el NDVI con la división de las bandas de Landsat 9 (NIR y RED), donde arrojó valores que van desde -1,0 a 1,0, siendo el valor superior a 0,4 considerado como una alta densidad de vegetación solo se logró identificar una área de 0,08 km², esto hace referencia a que el área de estudio está muy propensa a incendios forestales y que valores inferiores son determinantes para la realización de estos eventos, en tanto Quispe *et al.* (2024), quienes realizaron un análisis multitemporal mediante el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) con las imágenes de Landsat 8, donde lograron identificar una pérdida de vegetación de 40,04 km² de superficie, considerando que la vegetación densa o alta disminuyó en un 91,02%, finalmente la interacción con la población permitió identificar las causas principales como la expansión urbana y agrícola, lo que conllevaba a la pérdida de la vegetación; asimismo Villanueva

(2024), quien realizó un estudio basado en las imágenes Landsat 5 y 8, empleando un método comparativo de índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) para determinar la disminución de las áreas de vegetación, donde su valor más alto fue de 0,49 a 1, este valor identificó una gran disminución en la parte baja del área de estudio referido a los bofedales y pastos altoandinos, llegando a obtener un porcentaje de 28,7%.

También Mamani y Román (2021), realizaron una investigación indicando la reducción del NDVI en la laguna Paucarani, especialmente en los meses secos y durante los años con precipitaciones más bajas, refleja una pérdida continua de vegetación, posiblemente relacionada con el cambio climático. El incremento de las temperaturas mínimas desde 2012 y las variaciones en las precipitaciones favorecen condiciones más áridas, lo que aumenta la susceptibilidad de la región a incendios forestales. Estos incendios, a su vez, agravan la destrucción de la vegetación, perpetuando un ciclo de degradación que dificulta la recuperación natural. La correlación significativa entre el NDVI, las temperaturas y las precipitaciones destaca cómo el cambio climático podría estar amplificando los riesgos de incendios y acelerando la pérdida de vegetación en la zona.

La investigación actual, basada en el NDVI de Landsat 9, muestra una baja densidad de vegetación en el área de estudio, con solo 0,08 km² de alta vegetación, lo que sugiere un alto riesgo de incendios forestales. En contraste, Quispe *et al.* (2024) identificaron una pérdida de 40,04 km² de vegetación utilizando Landsat 8, vinculada a la expansión urbana y agrícola. Villanueva (2024), con Landsat 5 y 8, reportó una disminución del 28,7% en áreas de bofedales y pastos. Mamani y Román (2021) relacionaron la pérdida de vegetación con el cambio climático, destacando la influencia de las temperaturas y precipitaciones. Todos los estudios coinciden en que las actividades humanas y el cambio climático aumentan la susceptibilidad a incendios forestales.

CAPÍTULO V.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Se logró generar un modelo predictivo de áreas propensas a incendios forestales en la provincia de Chota mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG). Se desarrollaron dos modelos: el Modelo 01, que identificó de manera general áreas propensas con una extensión de 2 048,43 km², y el Modelo 02, que incorporó además los focos de calor, delimitando con mayor precisión las zonas críticas con una extensión de 777,96 km². Este último modelo presentó los mejores resultados, por lo que se considera el más adecuado para la investigación, constituyendo una herramienta confiable para la gestión del riesgo y la prevención de incendios forestales en la provincia.

Se concluye que los incendios forestales son fenómenos complejos influenciados principalmente por altas temperaturas, baja precipitación, pendientes pronunciadas y vegetación densa, condiciones que incrementan el riesgo de ocurrencia y propagación. El análisis de estos factores confirma que la interacción entre clima, topografía y cobertura vegetal desempeña un papel determinante en la dinámica de los incendios forestales.

La aplicación de técnicas de modelamiento en SIG fue clave para simular la distribución espacial de áreas propensas a incendios forestales. La integración de diferentes capas de información geoespacial permitió identificar las zonas de mayor riesgo en los distritos de Conchán, Chalamarca, Lajas, Miracosta, Querocoto y Tacabamba, proporcionando una herramienta eficaz para la planificación territorial, la gestión del uso del suelo y la prevención de desastres. Asimismo, los resultados obtenidos validan la importancia del uso de los SIG como soporte en la toma de decisiones ambientales.

Se utilizó el Índice de Calcificación Normalizada (NBR) con imágenes Landsat 9 para evaluar la severidad de los incendios en la zona de estudio. Este índice, calculado a partir de las bandas del infrarrojo cercano (B5 – NIR) y del infrarrojo de onda corta (B7 – SWIR), permitió detectar un área de 16,95 km² con alta severidad de afectación. Los resultados demuestran que el NBR es un indicador confiable para identificar áreas quemadas, cuantificar los daños en la cobertura vegetal y apoyar el monitoreo post - incendio en ecosistemas forestales.

5.2. Recomendaciones

Para mejorar la precisión de este modelo, sería ideal incorporar más variables, como la humedad del suelo o la velocidad del viento, que también pueden influir en el comportamiento de los incendios. Además, la validación continua y la actualización del modelo en función de cambios climáticos o en la cobertura vegetal garantizarían su efectividad a lo largo del tiempo. Este enfoque mejorado sería útil no solo para la prevención, sino también para políticas de manejo forestal y planificación de zonas de evacuación en situaciones de emergencia.

Para optimizar este modelo, se recomienda mejorar la detección de focos de calor mediante imágenes satelitales avanzadas o tecnologías de monitoreo en tiempo real. Además, incorporar un análisis temporal de los focos de calor ayudaría a identificar patrones y posibles picos de riesgo. Esto contribuiría al desarrollo de sistemas de alerta temprana, mejorando las respuestas rápidas ante incendios forestales y permitiendo a las autoridades intervenir más rápidamente en áreas críticas.

Se sugiere mejorar la precisión de los datos geospaciales mediante su actualización constante y la integración de fuentes como drones o sensores avanzados para obtener información más detallada y en tiempo real. También sería beneficioso desarrollar plataformas interactivas que

permitan a los gestores y comunidades visualizar en tiempo real las áreas de alto riesgo. En el futuro, combinar este modelo con tecnologías de inteligencia artificial permitirá una predicción más precisa del comportamiento del fuego y su propagación.

Se recomienda complementar el uso del NBR con otros índices como el EVI para una evaluación más integral de los daños post-incendio. Además, establecer un monitoreo continuo de la recuperación de las áreas afectadas permitirá adaptar las estrategias de restauración ecológica de manera eficiente. A largo plazo, esta técnica ayudará a mejorar los programas de rehabilitación de tierras quemadas y a tomar decisiones más informadas sobre la recuperación de ecosistemas afectados por incendios forestales.

CAPÍTULO VI.

REFERENCIAS

- Aliaga Nestares, V. J. (2021). *Operatividad del monitoreo y pronóstico meteorológico de condiciones atmosféricas favorables a incendios forestales en el Perú* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria la Molina]. <https://hdl.handle.net/20.500.12996/4836>
- Aliaga Nestares, V., Quispe, N., Ramos Parado, I., & Rodriguez Zimmermann, D. (2018). Estudio de condiciones atmosféricas favorables a los incendios forestales en el Perú. *Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología Del Perú*, 1–81. <https://hdl.handle.net/20.500.12542/199>
- Añamuro, H. H. (2019). *Detección de áreas afectadas por incendios forestales en la Reserva Nacional del Tticaca en el año 2016, utilizando geotecnologías* [Tesis de pregrado, Universidad Andina Néstor Cáceres Velásquez]. <http://repositorio.uancv.edu.pe/handle/UANCV/4774>
- Bahamóndez V., C., Barros Asenjo, S., Büchner, C., Cabrera Perramón, J., García, P., Ipinza Carmona, R., & Jofré Filgueira, P. A. (2013). Estado del arte. Las plantaciones forestales y el agua. In *Estado del arte. Las plantaciones forestales y el agua* (Issue December). INFOR. <https://doi.org/10.52904/20.500.12220/20434>
- BBC News Mundo, B. (2020). *Incendios en América Latina: la catástrofe que está afectando a gran parte del continente americano - BBC News Mundo*. BBC News. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-america-latina-54249424>
- Benavides, N. C. (2020). *Análisis de la severidad del incendio forestal suscitado en la Granja Porcón, a través de imágenes Sentinel - 2 – Periodo 2019 - 2021, Cajamarca* [Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo]. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/91567>

- Cáceres Coello, J. (2023). Comparación y análisis estadístico entre modelos de probabilidad de ocurrencia de incendios forestales para Honduras. Año 2019. *Ciencias Espaciales*, 14(2), 19–37. <https://doi.org/10.5377/ce.v14i2.16918>
- Campos, A. (2022). *Análisis multitemporal y espacial para determinar incendios aplicando teledetección e índice NBR periodo 2017- 2022 en el municipio de Culpina*. <https://revistas.usfx.bo/index.php/revistatecnicaconstruccion/article/view/1299>
- Carrillo Espinoza, J. I. (2022). Variabilidad climática en relación a datos meteorológicos en la región de Cajamarca del 2005 al 2020: Análisis estadístico. *Revista Científica: BIOTECH AND ENGINEERING*, 2(1). <https://doi.org/10.52248/eb.vol2iss1.42>
- Carrillo Garcia, R. L., Rodríguez Trejo, D. A., Tchikoué, H., Monterroso Rivas, A. I., & Santillan Pérez, J. (2012). Análisis espacial de peligro de incendios forestales en Puebla, México. *Interciencia*, 37(9), 678–683. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33925502012>
- Casado-Ramos, F., & Vargas-Sanabria, D. (2025). Incendios forestales y variables geográficas en la zona de amortiguamiento del Parque Internacional La Amistad, Costa Rica. *UNED Research Journal*, 17(1), e5499. <https://doi.org/10.22458/urj.v17i1.5499>
- Castillo, M. E. S., Garfias, R. S., Julio, G. A., & Gonzalez, L. R. (2012). Análisis de grandes incendios forestales en la vegetación nativa de Chile. *Interciencia*, 37(11), 796–804. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33925550002>
- CENEPRED. (2021). Escenario de Riesgo por Incendios Forestales de la Región Cusco. *Biblioteca SIGRID*, 1–49. http://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/storage/biblioteca//10471_escenario-de-riesgo-por-incendios-forestales.pdf
- CENEPRED. (2022). Escenario de Riesgo por Incendios Forestales de la Región Cajamarca. *Biblioteca SIGRID*, 1–56.

https://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/storage/biblioteca//14476_escenario-de-riesgo-por-incendios-forestales-de-la-region-cajamarca.pdf

Colonico, M., Tomao, A., Ascoli, D., Corona, P., Giannino, F., Moris, J. V., Romano, R., Salvati, L., & Barbati, A. (2022). Rural development funding and wildfire prevention: Evidences of spatial mismatches with fire activity. *Land Use Policy*, 117(June), 106079. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2022.106079>

Columba Tallana, M. J., Quisilema Ron, W. A., Padilla Almeida, O., & Toulkeridis, T. (2016). Identificación de zonas de recurrencia de incendios forestales mediante análisis multitemporal y aplicación de índices espectrales, en el distrito metropolitano de Quito. *Revista de Ciencias de Seguridad y Defensa*, 1(3), 7–13. https://www.researchgate.net/publication/317017416_IDENTIFICACION_DE_ZONAS_DE_RECURRENCIA_DE_INCENDIOS_FORESTALES_MEDIANTE_ANALISIS_MULTITEMPORAL_Y_APLICACION_DE_INDICES_ESPECTRALES_EN_EL_DISTRITO_METROPOLITANO_DE_QUITO/download

CONAE. (2016). Índices Espectrales derivados de imágenes satelitales Landsat 8 Sensor OLI. *CONAE*, 14. <https://catalogos.conae.gov.ar/landsat8/Docs/IndicesEspectralesDerivadosDeLandsat8.pdf>

CONAFOR, C. N. F. (2022). *Incendios - Sistema Nacional de Información Forestal*. Comisión Nacional Forestal, (CONAFOR). <https://snif.cnf.gob.mx/incendios/>

Diario Oficial el Peruano, E. peruano. (2023). *Incendios forestales arrasaron miles de hectáreas en el Perú en los últimos 20 años*. Diario Oficial El Peruano. <https://www.elperuano.pe/noticia/206515-igp-incendios-forestales-arrasaron-miles-de-hectareas-en-el-peru-en-los-ultimos-20-anos>

- Fernandes Ribeiro de Oliveira, V., Dos Santos da Silva, E., Pereira Vick, E., Machado da Silva, B. H., Ayumi de Souza Amede Sato, A., Matheus Bacani, V., Da Rocha Lima, C. G., Silva, A., & Salinas Chavez, E. (2024). Evaluación y gestión del riesgo de incendios forestales. *Geo UERJ*, 45. <https://doi.org/10.12957/geouerj.2024.76889>
- Fienco Bacusoy, A. R., Lafuente Díaz, W. R., & Mendoza Gavilánez, J. L. (2019). Estrategias de seguridad ambiental frente a los cambios climáticos en base a los incendios forestales. *Recimundo*, 3(1), 997–1023. [https://doi.org/10.26820/recimundo/3.\(1\).enero.2019.997-1023](https://doi.org/10.26820/recimundo/3.(1).enero.2019.997-1023)
- Gonzáles Vásquez, A. M. (2022). *Aplicación del índice normalizado de área quemada (NBR) y sistemas de información geográfica para estimar la severidad de los incendios forestales en el departamento de Cusco* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Federico Villareal]. <https://hdl.handle.net/20.500.13084/6714>
- Hernández-Sampieri, R., & Mendoza Torres, C. P. (2018). Las rutas Cuantitativa Cualitativa y Mixta. In *Metodología de la investigación. Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta* (McGRAW-HIL). [http://repositorio.uasb.edu.bo:8080/bitstream/54000/1292/1/Hernández-Metodología de la investigación.pdf](http://repositorio.uasb.edu.bo:8080/bitstream/54000/1292/1/Hernández-Metodología%20de%20la%20investigación.pdf)
- Ibarra-Montoya, J. L., & Huerta-Martínez, F. M. (2015). Modelado espacial de incendios: una herramienta predictiva para el Bosque La Primavera, Jalisco México. *Revista Ambiente & Agua*, 11(1), 37–49. https://www.researchgate.net/publication/291948152_Modelado_espacial_de_incendios_una_herramienta_predictiva_para_el_Bosque_La_Primavera_Jalisco_Mexico
- Instituto Nacional de Defensa Civil, I. (2023). *Incendios Forestales - Campañas - Instituto Nacional de Defensa Civil - Plataforma del Estado Peruano*. Instituto Nacional de Defensa Civil. <https://www.gob.pe/institucion/indeci/campañas/36225-incendios-forestales>

- Instituto Nacionales de Defensa Civil, I. (2016). *INDECI recomienda medidas de preparación y protección ante incendios forestales*. INDECI. <https://portal.indeci.gob.pe/emergencias/>
- Mamani Vargas, A. J. P., & Román Arce, C. R. (2021). Índice de vegetación y cambio climático: una evaluación multitemporal de imágenes Landsat en la laguna Pucarani en el periodo 1972 al 2018. *INGENIERÍA INVESTIGA*, 3(2), 96–106. <https://doi.org/10.47796/ing.v3i2.535>
- Marin Cordova, C. J. (2022). *Sistema de información geográfica y teledetección para analizar incendios forestales y sus consecuencias en el refugio de vida silvestre Laquipampa* [Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo]. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/98981>
- Meza, L. D. (2021). *La regulación del cambio climático referida a los incendios forestales y la pérdida de la biodiversidad en el Perú* [Tesis de pregrado, Universidad Científica del Sur]. <https://hdl.handle.net/20.500.12805/1771>
- Miguel, H., Zapata, M., & Rascón, J. (2020). La atipicidad legal medioambiental y el daño a los recursos naturales. El caso de los incendios forestales ocurridos en Chachapoyas y Luya, Perú. *Arnaldoa*, 27(1), 351–366. <http://doi.org/10.22497/arnaldoa.271.27122%0AISSN:>
- MINAM. (2017). Diseño metodológico para el desarrollo de un modelo predictivo de incendios. In *Dirección de Monitoreo y Evaluación de los Recursos Naturales del Territorio*. <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/disenometodologico-desarrollo-un-modelo-predictivo-incendios>
- MINAM. (2023). *Conoce las causas y consecuencias de los incendios forestales en nuestro país - Noticias - Ministerio del Ambiente - Plataforma del Estado Peruano*. Ministerio Del Ambiente - MINAM. <https://www.gob.pe/institucion/minam/noticias/812315-conoce-las-causas-y-consecuencias-de-los-incendios-forestales-en-nuestro-pais>
- Nakada, M. (2022). *Modelo digital de vulnerabilidad por incendios forestales en la provincia de*

- Cajamarca-Perú* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria la Molina].
<https://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12996/5217/nakada-bedriñana-masao.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- NASA. (2023). *What is Remote Sensing?* Nasa EARTHDATA.
<https://www.earthdata.nasa.gov/learn/backgrounders/remote-sensing>
- O'Hare, S. (2025). Evaluación de la recuperación de las selvas tropicales del Parque Nacional Main Range después de los incendios forestales Black Summer 2019/20 en Australia. *Revista Planeo*, 58, 1–19. <https://doi.org/10.7764/plan.058.140>
- Pazmiño, D. (2019). Peligro de incendios forestales asociado a factores climáticos en Ecuador. *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, 1(1), 10–18.
<https://doi.org/10.29166/revfig.v1i1.1800>
- Perea Ardila, M. A. (2024). Identificación de áreas prioritarias para la protección contra incendios forestales en el parque estatal de Cocó, Fortaleza, Brasil. *Geoconexões*, 3(20), 5–22.
<https://doi.org/10.15628/geoconexes.2024.17676>
- Polo, E. (2022). *Aplicación de sistemas de información geográficas al estudio del riesgo y prevención de incendios forestales en áreas naturales protegidas de Cuzco* [Tesis de pregrado, Universidad Privada del Norte]. <https://hdl.handle.net/11537/32017>
- Quispe Mera, Á. G., Murillo Chavez, E. A., Espinoza Mala, E. R., & Quispe Mera, L. V. (2024). Análisis multitemporal y geoespacial del índice de vegetación de diferencia normalizada en la subcuenca hidrográfica del río Chontaduro, Esmeraldas - Ecuador. *Revista Del Instituto de Investigación de La Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas*, 27(54), e28807.
<https://doi.org/10.15381/iigeo.v27i54.28807>
- Ramos-Rodríguez, M. P., & Reyes-Chancay, J. E. (2022). Programa de comunicación orientado a

- la prevención de los incendios forestales en Jipijapa, Manabí, Ecuador. In *Open Science Research VI* (Científica, pp. 288–311). Editora Científica Digital. <https://doi.org/10.37885/220910301>
- Ramos Rodríguez, M. P., Baque López, M. J., Jimenez González, A., Pionce Andrade, G. A., & Manrique Toala, T. O. (2018). Programa de comunicación sobre prevención de incendios forestales en el cantón Paján, Manabí, Ecuador. *Perspectivas Rurales Nueva Época*, 30. <https://doi.org/10.15359/prne.16-31.6>
- Requelme, O. (2020). *Modelo de gestión de riesgos en proyectos forestales - Cajamarca* [Tesis de posgrado, Universidad Nacional de Cajamarca]. <http://hdl.handle.net/20.500.14074/3919>
- Reyes-Bueno, F., & Balcazar-Gallegos, C. (2021). Factores que inciden en la probabilidad de ocurrencia de incendios forestales en Ecuador. *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, 11(1), 50–60. <https://doi.org/10.29166/revfig.v11i1.2634>
- Rotonto, P. (2021). *Evaluación del nivel de riesgo de los incendios forestales en el caserío Hipólito Unanue distrito de Campoverde Provincia del Coronel Portillo Región Ucayali* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ucayali]. <http://repositorio.unu.edu.pe/handle/UNU/4923?show=full>
- Salcedo Bautista, C. R. (2021). *Evaluación de la capacidad y tiempo de regeneración de la vegetación herbácea impactada por el incendio forestal en el cañón del río Chonta (Sangal) – Cajamarca* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Cajamarca]. <http://hdl.handle.net/20.500.14074/4078>
- SERFOR, S. N. F. y de F. S. (2016). *Lineamientos para la elaboración del Plan de Manejo Forestal Intermedio para permisos de aprovechamiento forestal en comunidades nativas y comunidades campesinas* (p. 47). <https://sinia.minam.gob.pe/normas/aprueban-lineamientos->

elaboracion-plan-manejo-forestal-intermedio

- Suarez, W. (2021). *Mapa de riesgo potencial de incendios forestales en la comunidad campesina Pícol Orcompugio - Distrito de San Jerónimo – Cusco – 2020* [Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo]. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/60873>
- Travieso Bello, A. C., & Soto, V. (2024). Caracterización de incendios forestales en el estado de Veracruz, México (2022-2024). *Revista Teoría y Praxis*, 33, 85–96. <https://doi.org/10.22403/UQROOMX/TyP33/10>
- UCH, U. de C. y H. (2023). *Blog de la Universidad de Ciencias y Humanidades UCH*. Universidad De Ciencias Y Humanidades. <https://blog.uch.edu.pe/ingenieria-electronica-con-mencion-en-telecomunicaciones/que-son-las-imagenes-satelitales/>
- Uyuni, G., Maillard, O., Azurduy, H., Flores-Valencia, M., Michme, G., & Viles-Almonacid, R. (2023). Identificación de áreas prioritarias para la restauración asistida en bosques afectados por incendios forestales en el departamento de Santa Cruz, Bolivia. *Ecología En Bolivia*, 58(2), 64–77. https://www.researchgate.net/publication/374229328_Identificacion_de_areas_prioritarias_para_la_restauracion_asistida_en_bosques_afectados_por_incendios_forestales_en_el_departamento_de_Santa_Cruz_Bolivia
- Valencia Flores, M., & Maillard, O. (2021). Detección y cuantificación de los incendios forestales 2020 : un análisis de la afectación en municipios , Tierras de Producción Forestal Permanente (TFPF) y áreas protegidas del departamento de. *Observatorio Bosque Seco Chiquitano*, January, 68. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.18401.53608>
- Vargas-Sanabria, D., & Campos-Vargas, C. (2018). Modelo de vulnerabilidad ante incendios forestales para el Área de Conservación Guanacaste, Costa Rica. *UNED Research Journal*,

10(2), 435–446. <https://doi.org/10.22458/urj.v10i2.2173>

Villanueva Ramírez, R. (2024). Evaluación del cambio en la cobertura vegetal de la subcuenca del río Quillcay mediante el índice de vegetación de diferencia normalizada. *Aporte Santiaguino*, 17(1). <https://doi.org/10.32911/as.2024.v17.n1.1151>

Villar-Hernández, B. de J., Pérez-Elizalde, S., Rodríguez-Trejo, D. A., & Pérez-Rodríguez, P. (2022). Análisis espacio temporal de la ocurrencia de incendios forestales en el estado mexicano de Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 13(74), 120–144. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v13i74.1274>

Zhiminaicela Cabrera, J. B., Quevedo-Guerrero, J. N., León-Salto, M. B., & Mora-Encalada, C. P. (2020). Algoritmo Semiautomático para Mapear Incendios Forestales y Estimar la Recuperación Vegetal Mediante Imágenes Landsat-8. *Revista Tecnológica - ESPOL*, 32(2), 35–42. <https://doi.org/10.37815/rte.v32n2.757>

CAPÍTULO VII.

ANEXOS

Figura 19

Representación cartográfica de las variables de estudio en la provincia de Chota

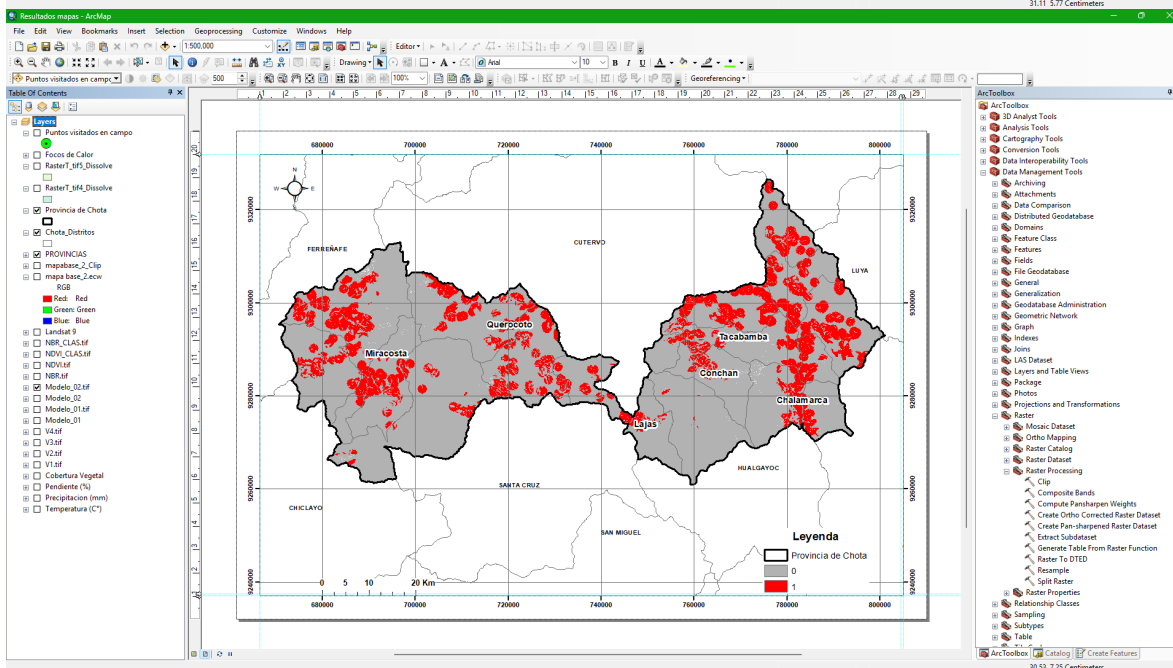
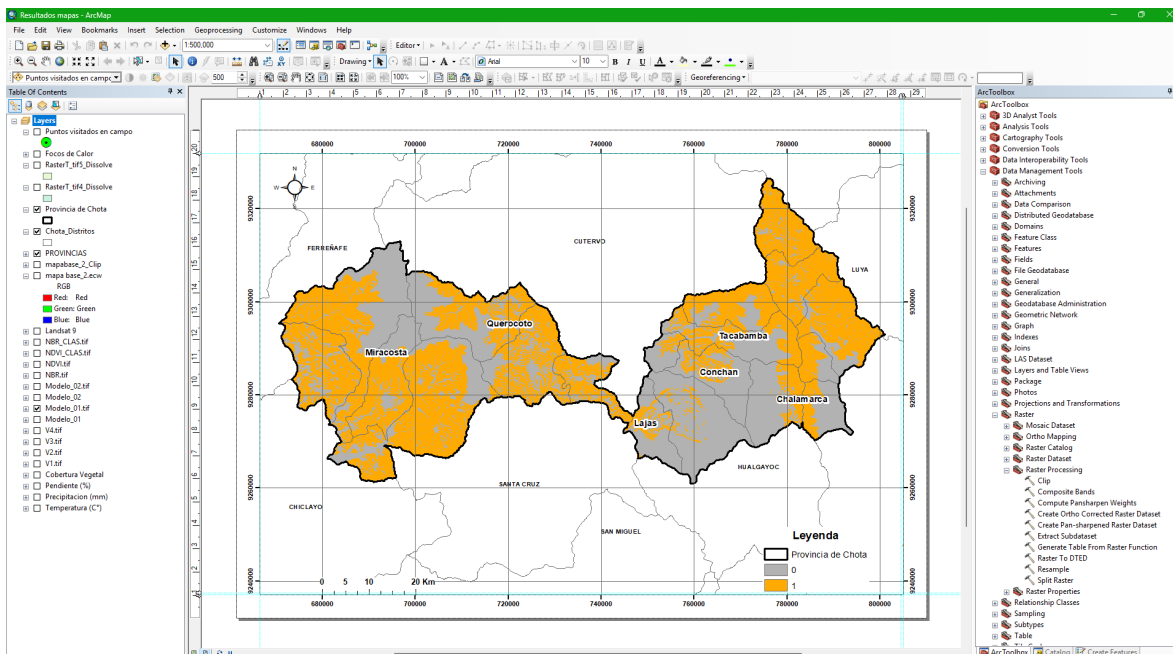


Figura 20

Áreas con antecedentes o riesgo de incendios forestales en el distrito de Tacabamba



Figura 21

Áreas con antecedentes o riesgo de incendios forestales en el distrito de Conchán



Figura 22

Áreas con antecedentes o riesgo de incendios forestales en el distrito de Querocoto



Figura 23

Áreas con antecedentes o riesgo de incendios forestales en el distrito de Miracosta



Figura 24

Áreas con antecedentes o riesgo de incendios forestales en el distrito de Chalamarca



Figura 25

Áreas con antecedentes o riesgo de incendios forestales en el distrito de Lajas

