



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**PREDICCIÓN DE ZONAS POTENCIALES PARA EL DESARROLLO DE INCENDIOS
FORESTALES BAJO EL ENFOQUE DE FACTORES METEOROLÓGICOS**

Rubí Abigail Gómez Córdova

Asesorado por el Ing. Walter Arnoldo Bardales Espinoza

Guatemala, marzo de 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**PREDICCIÓN DE ZONAS POTENCIALES PARA EL DESARROLLO DE INCENDIOS
FORESTALES BAJO EL ENFOQUE DE FACTORES METEOROLÓGICOS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

RUBÍ ABIGAIL GÓMEZ CÓRDOVA

ASESORADO POR EL ING. WALTER ARNOLDO BARDALES ESPINOZA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA AMBIENTAL

GUATEMALA, MARZO DE 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Raúl Eduardo Ticún Córdova
VOCAL V	Br. Henry Fernando Duarte García
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADORA	Inga. Casta Petrona Zeceña Zeceña
EXAMINADORA	Inga. María Alejandra Ma Villatoro
EXAMINADOR	Ing. Daunno Walther Chew Dávila
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

PREDICCIÓN DE ZONAS POTENCIALES PARA EL DESARROLLO DE INCENDIOS FORESTALES BAJO EL ENFOQUE DE FACTORES METEOROLÓGICOS

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 20 de noviembre de 2014.

Rubí Abigail Gómez Córdova

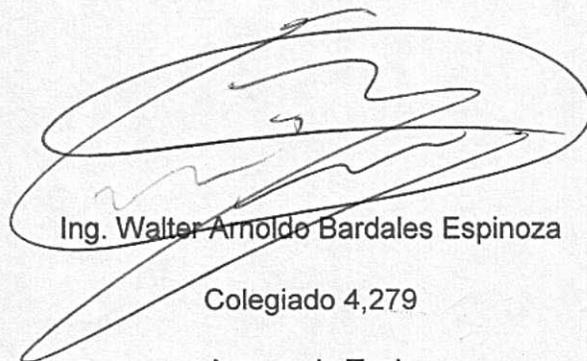
Guatemala, 23 de octubre de 2015

Ing. Víctor Manuel Monzón Valdés:
Director de Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería USAC

Por este medio me dirijo a usted para informarle que he revisado el informe final de Trabajo de Graduación "**Predicción de zonas potenciales para el desarrollo de incendios forestales bajo el enfoque de factores meteorológicos**". Elaborado por la estudiante de Ingeniería Ambiental, **Rubí Abigail Gómez Córdova**, identificada con el número de carné **200924507**, y considero que cumple los requisitos establecidos por la escuela. Por lo tanto apruebo para que pueda ser presentado.

Agradezco de antemano su colaboración.

Atentamente,



Ing. Walter Arnoldo Bardales Espinoza
Colegiado 4,279
Asesor de Tesis



M.Sc. Ing. Walter Arnoldo Bardales Espinoza
Maestro en Recursos Hidráulicos Opción Hidrología
Ingeniero Agrónomo
Colegiado 4279



Guatemala, 19 de enero de 2016.
Ref. EIQ.TG-IF.002.2016.

Ingeniero
Carlos Salvador Wong Davi
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Wong:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EIQ-PRO-REG-007 correlativo 099-2014 le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

Solicitado por la estudiante universitaria: **Rubí Abigail Gómez Córdova**.
Identificada con número de carné: **2009-24507**.
Previo a optar al título de **INGENIERA AMBIENTAL**.

Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

PREDICCIÓN DE ZONAS POTENCIALES PARA EL DESARROLLO DE INCENDIOS FORESTALES BAJO EL ENFOQUE DE FACTORES METEOROLÓGICOS

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Agrónomo: **Walter Arnoldo Bardales Espinoza**.

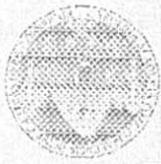
Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"


Ing. César Ariel Villela Rodas
COORDINADOR DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo



Ref.EIQ.TG.010.2016

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación de la carrera de **Ingeniería Ambiental** de la estudiante, **RUBÍ ABIGAIL GÓMEZ CÓRDOVA** titulado: **"PREDICCIÓN DE ZONAS POTENCIALES PARA EL DESARROLLO DE INCENDIOS FORESTALES BAJO EL ENFOQUE DE FACTORES METEOROLÓGICOS"**. Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

"Id y Enseñad a Todos"

Ing. Carlos Salvador Wong
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, febrero 2016

Cc: Archivo
CSWD/de





El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de graduación titulado: **PREDICCIÓN DE ZONAS POTENCIALES PARA EL DESARROLLO DE INCENDIOS FORESTALES BAJO EL ENFOQUE DE FACTORES METEOROLÓGICOS**, presentado por la estudiante universitaria: **Rubí Abigail Gómez Córdova**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano



Guatemala, marzo 2016

/cc

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Ser de luz que guía mi camino en todo momento y me ilumina para tomar decisiones que permiten que alcance todas mis metas y aspiraciones.
- Mis padres** Helder Ulises Gómez y Rebeca Abigail Córdova Sánchez, por su esfuerzo y ejemplo de superación; sobre todo por el amor incondicional, confianza, dedicación y apoyo que siempre me brindan. ¡Los amo! Gracias por todo.
- Mis hermanos** Helder Fabián y Jeimy Nairobi Gómez Córdova, por su amor y apoyo incondicional y por ser un gran ejemplo para mí.
- Mis sobrinos** Fabián André y Helder Gabriel Gómez Ramírez, por el amor y alegría que han traído a mi vida.
- Mis abuelos** En especial a María Teresa del Pilar Gómez Sánchez (q. e. d. p.), por su paciencia, amor y consejos.

Mis tíos

Por sus consejos, cariño y apoyo.

Mis primos

Por su cariño y por los momentos especiales que hemos vivido.

Mis amigos

Por su valiosa amistad, cariño y por los momentos inolvidables que compartimos.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser fundamental en el proceso de mi formación como profesional, en especial a la Escuela de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería.
Mis padres	Por el amor y apoyo incondicional que me han brindado.
Mis hermanos	Por sus muestras de apoyo y aliento durante el desarrollo de este estudio.
Mi asesor	Ing. Walter Arnoldo Bardales Espinoza, por su orientación y apoyo en el desarrollo de esta investigación.
Insivumeh	Por permitirme hacer uso de sus instalaciones y brindarme lo necesario para el desarrollo de esta investigación.
Sipecif	Por brindarme todo lo requerido para llevar a cabo esta investigación.

2.4.1.	Incendios de superficie.....	10
2.4.2.	Incendios de copas	10
2.4.3.	Incendios de subsuelo.....	11
2.4.4.	<i>Spotting fires</i>	11
2.5.	La gran triada	11
2.6.	Formas de los incendios forestales	11
2.6.1.	Forma circular	12
2.6.2.	Forma elíptica.....	12
2.6.3.	Forma irregular.....	12
2.7.	Metodologías para la predicción del desarrollo y propagación de incendios forestales	12
2.7.1.	Modelización matemática y estadística	13
2.7.2.	Teledetección	13
2.7.3.	Modelos SIG.....	14
2.7.4.	Sensores	14
2.8.	Índices de riesgo de ocurrencia de incendios forestales	14
2.8.1.	Índice de Monte Alegre o Soares	15
2.8.2.	Índice de Chandler	17
3.	METODOLOGÍA	19
3.1.	Variables	19
3.1.1.	Temperatura.....	19
3.1.2.	Temperatura máxima diaria.....	19
3.1.3.	Temperatura de punto de rocío	20
3.1.4.	Tensión de vapor.....	20
3.1.5.	Humedad relativa	20
3.1.6.	Humedad relativa máxima.....	21
3.1.7.	Precipitación.....	21
3.1.8.	Radiación solar.....	21

3.1.9.	Insolación.....	22
3.1.10.	Nubosidad.....	22
3.1.11.	Viento	22
3.1.12.	Presión atmosférica	23
3.1.13.	Delimitación del campo de estudio	23
3.2.	Recursos humanos disponibles.....	23
3.3.	Recursos materiales disponibles	24
3.4.	Técnica cuantitativa	24
3.5.	Recolección y ordenamiento de la información	28
3.6.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información	30
3.7.	Análisis estadístico	34
3.7.1.	Análisis probabilístico booleano.....	34
3.7.2.	Análisis de correlación lineal.....	37
4.	RESULTADOS	39
4.1.	Cantidad de incendios forestales desarrollados durante el período del 2001 al 2013.....	39
4.2.	Superficie afectada por los incendios forestales registrados durante el período 2001-2013	41
4.3.	Caracterización de los incendios forestales por departamento	55
4.4.	Horario recurrente de desarrollo de incendios forestales	66
4.5.	Causas de la generación de los incendios forestales presentados durante el período 2001-2013.....	68
4.6.	Regionalización de las variables meteorológicas que influyen en el desarrollo de los incendios forestales.....	69
4.7.	Modelos numéricos para la predicción de zonas potenciales para el desarrollo de incendios forestales	71

4.7.1.	Modelo numérico establecido para la región 1	71
4.7.1.1.	Ecuación para la predicción de incendios forestales en la región 1	72
4.7.2.	Modelo numérico establecido para la región 2	74
4.7.2.1.	Ecuación para la predicción de incendios forestales en la región 2	74
4.7.3.	Modelo numérico establecido para la región 3	76
4.7.3.1.	Ecuación para la predicción de incendios forestales en la región 3	77
4.7.4.	Modelo numérico establecido para la región 4	79
4.7.4.1.	Ecuación para la predicción de incendios forestales en la región 4	79
4.8.	Validación de los modelos numéricos	81
5.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	87
	CONCLUSIONES	95
	RECOMENDACIONES	97
	BIBLIOGRAFÍA	99
	APÉNDICES	103

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Triángulo de fuego	6
2.	Ejemplo base de datos de incendios forestales.	26
3.	Ejemplo de formato de registro de las variables meteorológicas.	27
4.	Radio de influencia de cada estación meteorológica.	28
5.	Incendios forestales dentro del área de influencia de cada estación meteorológica.....	29
6.	Incendios forestales registrados por año, durante el período 2001-2013.....	39
7.	Incendios forestales registrados por departamento, durante el período 2001-2013.....	40
8.	Tipo de superficie afectada según la cantidad de incendios forestales registrados durante el período 2001-2013.....	41
9.	Superficie afectada por los incendios forestales ocurridos durante el período 2001-2013.....	42
10.	Superficie forestal y no forestal afectada por los incendios forestales ocurridos durante el período 2001-2013.....	43
11.	Tipo de superficie afectada por los incendios forestales ocurridos durante el período 2001-2013.....	43
12.	Cantidad de hectáreas afectadas por año, durante el período 2001-2013.....	44
13.	Cantidad y tipo de superficie afectada por año, durante el período 2001-2013.....	45

14.	Cantidad y tipo de superficie forestal afectada por año, durante el período 2001-2013.....	46
15.	Porcentaje de bosques de coníferas afectados por año, durante el período 2001-2013.....	47
16.	Porcentaje de bosques de latifolias afectados por año, durante el período 2001-2013.....	48
17.	Porcentaje de áreas forestales no protegidas afectadas por año, durante el período 2001-2013.....	49
18.	Cantidad de hectáreas afectadas por departamento, durante el período 2001-2013.....	50
19.	Cantidad y tipo de superficie afectada por departamento, durante el período 2001-2013.....	51
20.	Cantidad y tipo de superficie forestal afectada por departamento, durante el período 2001-2013.....	52
21.	Porcentaje de bosques de coníferas afectados por departamento, durante el período 2001-2013.....	53
22.	Porcentaje de bosques de latifolias afectados por departamento, durante el período 2001-2013.....	54
23.	Porcentaje de áreas no protegidas afectadas por departamento, durante el período 2001-2013.....	55
24.	Histograma de cantidad de incendios forestales por mes y climadiagrama de Alta Verapaz. Período 2001-2013.....	56
25.	Histograma de cantidad de incendios forestales por mes y climadiagrama de Baja Verapaz. Período 2001-2013.....	56
26.	Histograma de cantidad de incendios forestales por mes y climadiagrama de Chimaltenango. Período 2001-2013.....	57
27.	Histograma de cantidad de incendios forestales por mes y climadiagrama de Chiquimula. Datos del período 2001-2013.	57

28.	Histograma de cantidad de incendios forestales por mes y climadiagrama de El Progreso. Período 2001-2013.....	58
29.	Histograma de cantidad de incendios forestales por mes y climadiagrama de Escuintla. Período 2001-2013.....	58
30.	Histograma de cantidad de incendios forestales por mes y climadiagrama de Guatemala. Período 2001-2013.....	59
31.	Histograma de cantidad de incendios forestales por mes y climadiagrama de Huehuetenango. Período 2001-2013.....	59
32.	Histograma de cantidad de incendios forestales por mes y climadiagrama de Izabal. Período 2001-2013.....	60
33.	Histograma de cantidad de incendios forestales por mes y climadiagrama de Jalapa. Período 2001-2013.....	60
34.	Histograma de cantidad de incendios forestales por mes y climadiagrama de Jutiapa. Período 2001-2013.....	61
35.	Histograma de cantidad de incendios forestales por mes y climadiagrama de Petén. Período 2001-2013.....	61
36.	Histograma de cantidad de incendios forestales por mes y climadiagrama de Quetzaltenango. Período 2001-2013.....	62
37.	Histograma de cantidad de incendios forestales por mes y climadiagrama de Quiché. Período 2001-2013.....	62
38.	Histograma de cantidad de incendios forestales por mes y climadiagrama de Retalhuleu. Período 2001-2013.....	63
39.	Histograma de cantidad de incendios forestales por mes y climadiagrama de Sacatepéquez. Período 2001-2013.....	63
40.	Histograma de cantidad de incendios forestales por mes y climadiagrama de Santa Rosa. Período 2001-2013.....	64
41.	Histograma de cantidad de incendios forestales por mes y climadiagrama de San Marcos. Período 2001-2013.....	64

42.	Histograma de cantidad de incendios forestales por mes y climadiagrama de Sololá. Período 2001-2013	65
43.	Histograma de cantidad de incendios forestales por mes y climadiagrama de Suchitepéquez. Período 2001-2013	65
44.	Histograma de cantidad de incendios forestales por mes y climadiagrama de Zacapa. Período 2001-2013	66
45.	Histograma de cantidad de incendios forestales por hora, durante el período 2001-2013.....	67
46.	Probabilidad empírica de ocurrencia de los incendios forestales por hora	68
47.	Principales causas que dan origen a los incendios forestales	69
48.	Resultados del grado de peligro de incendios forestales en la región 1.....	73
49.	Resultados del grado de peligro de incendios forestales en la región 2.....	76
50.	Resultados del grado de peligro de incendios forestales en la región 3.....	78
51.	Resultados del grado de peligro de incendios forestales en la región 4.....	80

TABLAS

I.	Escala de peligro de incendio forestal	16
II.	Corrección por lluvia	16
III.	Escala de riesgo de incendio forestal	17
IV.	Cantidad de incendios forestales según tipo de superficie afectada, durante el periodo 2001-2013.....	30
V.	Cantidad de incendios forestales y superficie afectada, durante el período 2001-2013.....	31

VI.	Cantidad y tipo de superficie forestal afectada, durante el período 2001-2013.....	32
VII.	Cantidad de incendios forestales y superficie afectada por departamento, durante el período 2001-2013.....	32
VIII.	Cantidad y tipo de superficie forestal afectada por departamento, durante el período 2001-2013.....	33
IX.	Condiciones meteorológicas que muestran mayor probabilidad de iniciación del fuego, según región.	70
X.	Rangos de temperatura ambiente y humedad relativa a las 13:00 horas en la región 1.....	71
XI.	Comparación de los parámetros de ajuste entre la ecuación del índice de Chandler original y la ecuación de la región 1.....	72
XII.	Grado de peligro de incendios forestales en la región 1.	73
XIII.	Rangos de temperatura ambiente y humedad relativa a las 13:00 horas en la región 2.....	74
XIV.	Comparación de los parámetros de ajuste entre la ecuación del índice de Chandler original y la ecuación de la región 2.....	75
XV.	Grado de peligro de incendios forestales en la región 2.....	75
XVI.	Rangos de temperatura ambiente y humedad relativa a las 13:00 horas en la región 3.....	76
XVII.	Comparación de los parámetros de ajuste entre la ecuación del índice de Chandler original y la ecuación de la región 3.....	77
XVIII.	Grado de peligro de incendios forestales en la región 3.	78
XIX.	Rangos de temperatura ambiente y humedad relativa a las 13:00 horas en la región 4.....	79
XX.	Comparación de los parámetros de ajuste entre la ecuación del índice de Chandler original y la ecuación de la región 4.....	80
XXI.	Grado de peligro de incendios forestales en la región 4.....	81

XXII.	Grado de peligro de ocurrencia de incendios forestales, según datos de validación del modelo numérico de la región 1	81
XXIII.	Grado de peligro de ocurrencia de incendios forestales, según datos de validación del modelo numérico de la región 2	82
XXIV.	Grado de peligro de ocurrencia de incendios forestales, según datos de validación del modelo numérico de la región 3	82
XXV.	Grado de peligro de ocurrencia de incendios forestales, según datos de validación del modelo numérico de la región 4	83
XXVI.	Porcentaje de aciertos de los incendios ocurridos durante el 2015 para la región 1	83
XXVII.	Porcentaje de aciertos de los incendios ocurridos durante el 2015 para la región 2.....	84
XXVIII.	Porcentaje de aciertos de los incendios ocurridos durante el 2015 para la región 3.....	84
XXIX.	Porcentaje de aciertos de los incendios ocurridos durante el 2015 para la región 4.....	85

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A	Álgebra de Boole
e	Base de logaritmo natural
cm^2	Centímetros cuadrados
r	Coefficiente de correlación lineal
\rightarrow	Entonces
E	Espacio muestral
$^{\circ}\text{C}$	Grados Celsius
hrs	Horas
H	Humedad relativa
H_{max}	Humedad relativa máxima
IC	Índice de Chandler
FMA	Índice de Monte Alegre
$FMA+$	Índice de Monte Alegre alterado
\cap	Intersección
kcal	Kilocalorías
kg	Kilogramos
km/h	Kilómetros por hora
mm	Milímetros
mmHg	Milímetros de mercurio
min	Minuto
CO	Monóxido de carbono
nd	No hay dato
n	Número

O_2	Oxígeno
ε	Pertenece
%	Porcentaje
P	Probabilidad
\emptyset	Suceso imposible
Σ	Sumatoria
T	Temperatura
$T_{\text{rocío}}$	Temperatura del punto de rocío
T_{max}	Temperatura máxima
T_{hum}	Temperatura medida con termómetro de bulbo húmedo.
T_{seco}	Temperatura medida con termómetro de bulbo seco
U	Unión
V	Velocidad del viento

GLOSARIO

ArcGIS	Software de sistemas de información geográfica que permite recopilar, crear, administrar, analizar, compartir y difundir información geográfica en forma de datos, modelos y mapas.
Bosque de coníferas	Comunidad de árboles de especies de las familias y géneros del tipo gimnospermas, que se caracterizan por tener hojas estrechas, aciculares o escamadas.
Bosque latifoliado	Comunidad de árboles de especies de las familias y géneros del tipo angiospermas, que se caracterizan por tener hojas anchas y planas.
Calor específico	Cantidad de calor que necesita una unidad de masa de una sustancia para elevar su temperatura un grado Celsius.
Climadiagrama	Representación gráfica de los datos de temperatura y precipitación mensuales de una región, para un período de tiempo determinado.
Fenómeno de El Niño	Fenómeno climático que se presenta cíclicamente e implica cambios en la temperatura de las aguas del océano Pacífico ecuatorial tropical, afectando el clima de diferentes países, entre ellos Guatemala,

principalmente en el aumento de temperatura ambiente y disminución de la lluvia.

GEI's	Gases de efecto invernadero.
Insivumeh	Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología.
Octa	Medida de nubosidad, correspondiente a la octava parte del cielo.
Peligro	Cualquier acción o condición que presenta el potencial de producir un incidente dañino.
<i>Pinus oocarpa</i>	Nombre científico del pino Amarillo, nativo de América.
Riesgo	Probabilidad de ocurrencia de un evento particular de consecuencias perjudiciales.
SIG	Sistema de Información Geográfica.
Sipecif	Sistema Nacional de Prevención y Control de Incendios Forestales.
SPSS	<i>Statistical Product and Service Solutions.</i>
Superficie forestal	Superficie cubierta por bosques naturales o plantaciones.

Superficie no forestal	Área desprovista de cualquier tipo de bosque o plantación.
Teledetección	Técnica de adquisición a distancia de datos de la superficie de la Tierra que se realiza mediante satélites y sondas artificiales (captura de ondas electromagnéticas). La información es procesada posteriormente para obtener información interpretable de la superficie terrestre.
Vulnerabilidad	Predisposición intrínseca de un sistema a sufrir daño debido a posibles acciones externas.
WRF	<i>Wheater Research and Forecasting.</i>

RESUMEN

Guatemala es un país con vocación forestal que se encuentra ante la amenaza constante de reducción de su cobertura boscosa. Entre las principales causas que contribuyen a esta reducción se encuentra la deforestación por incendios forestales. Entre el período 2001-2013 el porcentaje de deforestación en el país fue de 3,9 % y el porcentaje de pérdida de superficie boscosa por incendios, del 2,4 %.

De tal forma que esta investigación tuvo como finalidad establecer una herramienta que permitiera pronosticar las zonas potenciales en donde se puedan desarrollar incendios forestales dentro del territorio guatemalteco, tomando en cuenta las condiciones meteorológicas que se pueden presentar en un determinado lugar. Esta herramienta, es un modelo numérico que se basa en las variables meteorológicas de temperatura ambiente y humedad relativa, que se registran a las 13:00 horas; estas fueron las variables independientes, mientras que los incendios forestales actuaron como la variable dependiente.

El modelo numérico se formuló a partir de la base de datos de incendios forestales del Sistema Nacional de Prevención y Control de Incendios Forestales (Sipacific) y de los registros meteorológicos correspondientes a las boletas de campo, de las diferentes estaciones del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (Insivumeh). El modelo numérico se obtuvo a partir del índice de Chandler, ajustando los parámetros y escalas por medio de diferentes métodos estadísticos, para lo cual se utilizó el software estadístico SPSS.

OBJETIVOS

General

Proponer y desarrollar un modelo numérico de predicción de zonas potenciales para el desarrollo de incendios forestales mediante el uso de variables meteorológicas.

Específicos

1. Determinar el horario recurrente en el que se desarrollan los incendios forestales.
2. Identificar las variables meteorológicas que influyen en el desarrollo de un incendio forestal.
3. Elaborar un modelo numérico para la predicción de incendios forestales, basado en factores meteorológicos.
4. Realizar la validación del modelo numérico de predicción de incendios forestales, utilizando los registros de los años 2014 y 2015.

Hipótesis

Hipótesis de trabajo

Los incendios forestales se originan y propagan si las condiciones meteorológicas favorecen el evento y debido a su variabilidad actúan como potencializadores del fuego y permiten que este se intensifique; en consecuencia, estas se encuentran relacionadas con la ignición, expansión y comportamiento de incendios forestales.

Hipótesis estadística

- **Hipótesis nula**

Las condiciones meteorológicas no se relacionan con el origen y desarrollo de los incendios forestales; debido a su variabilidad no actúan como potencializadores del fuego ni permiten que un evento se intensifique; por tanto, no se relacionan con la ignición, expansión y comportamiento de los incendios forestales.

- **Hipótesis alternativa**

Las condiciones meteorológicas favorecen la intensificación y debido a su variabilidad, intervienen como potencializadores del fuego de los incendios forestales; contribuyendo así con la propagación, expansión y comportamiento de los mismos.

INTRODUCCIÓN

Las condiciones geográficas, topográficas y climáticas de Guatemala, lo hacen un país vulnerable al desarrollo de incendios forestales durante la época seca del año. Por tanto, la predicción de la ocurrencia de un incendio forestal implica un gran aporte para el desarrollo sustentable del país, pues se evita la pérdida de bosque, permitiendo reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI's), y preservar los ecosistemas forestales y la vida silvestre.

Por tal razón, es de verdadera importancia para el país proponer y generar un instrumento que permita develar las zonas potenciales en las que puede ocurrir un incendio forestal. Un modelo numérico que pronostique incendios forestales constituye herramienta confiable que ayuda a detectar las zonas más amenazadas y vulnerables del territorio nacional, permitiendo implementar un mejor sistema de prevención ante la iniciación del fuego y como consecuencia reducir la vulnerabilidad ante estos eventos en los diferentes departamentos del país.

1. ANTECEDENTES

Desde hace algunas décadas se han creado modelos numéricos de predicción y propagación de fuego; los diferentes modelos que han sido formulados suelen ser agrupados en: modelos empíricos, semiempíricos, semifísicos, físicos y probabilísticos (Unión Europea, 2011).

Existe una gran variedad de modelos numéricos, creados para el combate de incendios forestales, entre los más antiguos se encuentra el modelo de Fons, generado en 1966 y en el mismo año McArthur desarrolló modelos empíricos con los que se determina la velocidad del frente de llamas, con base en la humedad relativa y temperatura del lugar, fracción de materia muerta y la velocidad del viento.

En 1972 se creó el modelo físico de Rothermel, este sigue siendo ampliamente utilizado en varios países y predice la propagación del fuego en un lecho combustible homogéneo a partir de las características físicas de la combustión. Posteriormente, Albini propuso un modelo en 1985, el que es considerado de los mejores modelos físicos hasta la fecha; con base en este modelo se predice la ignición y propagación del fuego tomando en cuenta el tipo de combustible y flujo de calor.

Por otro lado, el modelo numérico *Forestry Canada Fire Danger Group*, creado en 1992, toma en cuenta el tipo de combustible, la velocidad del viento y la pendiente del terreno para predecir la velocidad de propagación del fuego y el flujo de calor por metro lineal. Subsiguientemente, en el 2000 fue desarrollado el modelo Morandini, un modelo basado en la cuantificación de radiación,

tomando en cuenta los factores de viento y pendiente; este logra establecer una modelización semifísica de la propagación de un incendio de combustibles vegetales.

En los últimos años se han seguido investigando y generando modelos numéricos enfocados en predecir el desarrollo y propagación de un incendio forestal; uno de ellos es el modelo basado en la probabilidad de ignición asociada a factores humanos, a la ocurrencia de rayos y al estado hídrico de la vegetación, creado en el 2007 por el Departamento de Geografía de la Universidad de Alcalá, con el que se obtiene el peligro de ocurrencia de incendios forestales mediante el uso de teledetección y sistemas de información geográfica.

También se cuenta con el modelo GD, propuesto por Domínguez en 2008, que es uno de los más reconocidos recientemente y pronostica la probabilidad de ocurrencia de un incendio forestal, bajo determinadas condiciones meteorológicas; este modelo supone que para la propagación de un incendio, si bien la temperatura favorece al mismo, no es determinante. Por otro lado, el modelo planteado por Vilar, en el 2009, tiene un enfoque diferente, ya que está basado en la actividad humana, para pronosticar la ocurrencia de incendios forestales.

A través de lo mencionado anteriormente, es posible observar que a lo largo de los años se han creado diversos modelos numéricos para la predicción de incendios forestales; estos se han ido implementado en diferentes países alrededor del mundo. A pesar de que dicho sistema de prevención contra el desarrollo de incendios forestales es relativamente nuevo, ya han pasado más de 40 años desde que se creó el primer modelo numérico para dicho fin y en el caso de Guatemala, el país no cuenta con ningún sistema de predicción de

riesgo de ocurrencia y propagación de incendios forestales. Por lo que, la mayor parte del tiempo, se requiere de medidas de mitigación para combatir este tipo de eventos.

Durante el período comprendido entre el 2001 al 2014, el Sipecif ha recabado la información de los incendios forestales que han ocurrido en el territorio nacional. A esto se agrega, que el Insivumeh posee la información requerida de condiciones meteorológicas que se presentaron en el desarrollo y propagación del fuego. Por tanto, actualmente Guatemala cuenta con los registros necesarios para la generación de un modelo numérico que pueda llegar a predecir el desarrollo de los incendios forestales, bajo el enfoque que las variables meteorológicas son las precursoras para el desarrollo y la propagación de un incendio forestal.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Fuego

El fuego “es una reacción química en cadena con desprendimiento de luz y calor producidos por la combustión de un cuerpo” (Bonilla, 2001, p. 10). Si el fuego no se llega a prolongar, entonces es conocido como incandescencia. Para que en un fuego persista la combustión, esta debe ser continua, sin que sea necesario que la fuente de ignición inicial se mantenga.

2.2. Incendio forestal

Un incendio forestal es un fuego que se genera en los bosques, puede producirse de forma natural o bien ser provocado por la acción intencional o accidental del ser humano y se prolonga sin ningún control, extendiéndose generalmente en dirección del viento (Bonilla, 2001).

En los incendios forestales, como en la mayoría de reacciones de combustión no controladas, se produce humo, que no es más que la “mezcla de gases y partículas de material que no han llegado a arder totalmente y que se desprenden de los cuerpos en combustión” (Bonilla, 2001, p. 11). Habitualmente, el humo que se crea durante el desarrollo de un incendio forestal contiene “nitrógeno, dióxido de carbono, hollín y productos derivados del carbón que son liberados de los combustibles” (Quiñónez, 2006, p. 4).

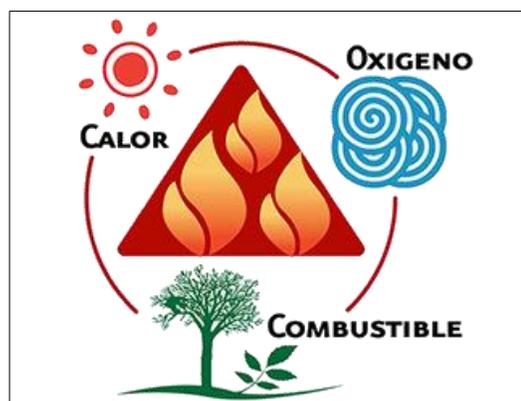
2.3. Triángulo de fuego

Como lo menciona Bonilla (2001), tres elementos son indispensables para que se dé origen a un fuego y que este persista: combustible, oxígeno y calor. Estos son los componentes del denominado triángulo de fuego.

Cuando estos elementos coexisten en un lugar y tiempo determinado, en proporciones adecuadas, el fuego se activa. Mientras que en condiciones en donde uno de estos tres elementos se encuentra ausente, el fuego no se genera o se disipa.

Con base en el triángulo de fuego, se ponen en práctica diferentes técnicas de extinción de incendios forestales; ya sea aislando el aire u oxígeno, reduciendo la temperatura a grados inferiores a los que se genera la combustión o separando los materiales combustibles (Bonilla, 2001).

Figura 1. Triángulo de fuego



Fuente: Comité Estatal de Prevención y Combate de Incendios Forestales y Manejo del Fuego en Jalisco. Incendios Forestales. siga.jalisco.gob.mx/incendiosforestales/prevención.htm.

Consulta: 3 de abril de 2015.

2.3.1. Oxígeno

El término oxígeno, para el caso del triángulo de fuego se refiere al gas diatómico (O_2) presente de forma natural y abundante dentro de la atmósfera terrestre, el cual es imprescindible para que se produzca la combustión.

La atmósfera terrestre está compuesta por un 21 % de oxígeno, haciéndolo el segundo gas más cuantioso dentro de la misma, siendo rebasado por el nitrógeno, el cual conforma el 78 % de la atmósfera. Para que un fuego se inicie y mantenga se necesita al menos un 16 % de oxígeno y no más del 21 % del mismo (Bonilla, 2001).

2.3.2. Calor

El calor se define como “la transferencia de energía entre dos cuerpos que se encuentran a diferente temperatura” (Bonilla, 2001, p. 11). Este permite que los materiales emitan vapores inflamables que al mezclarse con el oxígeno causen explosiones, lo cual lo convierte en el componente principal de la combustión y la expansión del fuego.

2.3.2.1. Mecanismos de propagación del calor

El fuego se inicia en un punto específico y se propaga por el terreno debido a tres fenómenos: conducción, convección y radiación.

2.3.2.1.1. Conducción

La conducción se refiere a la transferencia de calor de un cuerpo con mayor temperatura, hacia otro con menor temperatura, produciendo que la

temperatura aumente en este último. Esta transmisión de calor se da únicamente entre cuerpos en estado sólido. Como lo menciona Malen (2009) se cree que el origen de este fenómeno se encuentra en el movimiento entre electrones libres que transportan energía cuando existe una diferencia de temperaturas.

2.3.2.1.2. Convección

En el fenómeno conocido como convección, el calor se transfiere de una materia a otra, a través de un fluido, en dirección del viento (Bonilla, 2001).

La convección transfiere calor de una parte del fluido a otra parte del mismo. Esto ocurre porque se genera un movimiento del fluido debido a la no homogeneidad de su temperatura. Así pues, Malen (2009) establece que es de esperarse que el fluido más frío y pesado descienda, por el contrario el fluido más caliente y menos denso asciende.

2.3.2.1.3. Radiación

“La radiación es la energía que emite una sustancia; mientras mayor es la temperatura de la sustancia, mayor es la energía que se emite” (Malen, 2009, p. 6). A diferencia de los mecanismos mencionados anteriormente, la radiación permite el intercambio de calor entre sustancias que no se encuentran en contacto directo.

2.3.3. Combustible

Toda aquella “sustancia que se enciende con facilidad y que al mezclarse con materiales oxidantes da lugar a una combustión” (Bonilla, 2001, p. 11), se

denomina combustible. Por este motivo, se considera como combustible forestal a toda aquella sustancia y material vivo o muerto presente en un bosque, que puede llegar a arder (Quiñónez, 2006).

2.3.3.1. Tipos de combustión

Existen dos tipos de combustión: cuando una combustión ocurre en condiciones en donde la presencia de oxígeno es abundante, la combustión es completa y como resultado se obtiene dióxido de carbono y vapor de agua.

Por otro lado, una combustión incompleta se origina cuando existe un alto contenido de humedad en el área circundante y por tanto, el oxígeno es escaso. En este caso, además de dióxido de carbono y vapor de agua, se obtienen otros subproductos de la reacción de combustión, como el monóxido de carbono (CO). Debido a las características y condiciones de los bosques, cuando ocurren incendios forestales, la combustión es incompleta y se observa una alta formación de humo.

2.3.3.2. Proceso de combustión

Para la generación de fuego primero debe existir una fase de precalentamiento, que se produce por la existencia de una fuente de calor, a la que es expuesta la materia combustible. Según Bonilla (2001) en esta fase se llega a observar la formación de humo, debido a que la humedad está siendo eliminada de los materiales. Si este proceso no se detiene, la temperatura aumenta hasta alcanzar el punto de ignición, es decir, la temperatura a la que la materia combustible arde sin necesidad de añadir más calor.

Cuando se alcanza esta temperatura, que varía de un material a otro, se produce la combustión y con esta reacción se observan llamas, ya que el material combustible se encuentra ardiendo. Además, Bonilla (2001) también establece que la ignición acelera el proceso de combustión y durante el desastre, la temperatura puede alcanzar hasta 1 000 °C y se llegan a producir grandes cantidades de humo.

2.4. Tipos de incendios forestales

La clasificación de los incendios forestales se realiza dependiendo de la cota en la que se desarrolla el fuego. Es importante mencionar que las diferentes clases de incendios pueden llegar a ocurrir de forma simultánea.

2.4.1. Incendios de superficie

Los incendios de superficie se propagan con rapidez, ya que se encuentra en un contacto continuo con el aire. Se definen como aquellos incendios que avanzan sobre el suelo, siendo los materiales afectados generalmente pastos, arbustos, hierbas, matorrales y todo tipo de vegetación de corta altura (Malen, 2009).

2.4.2. Incendios de copas

Esta clase de incendios se desarrolla en las copas y ramas altas de los árboles. El fuego llega a alcanzar altas velocidades porque el aire sopla con mayor fuerza a la altura en la que se desarrollan.

Generalmente los incendios de copas ocurren por la elevación de las llamas de los incendios de superficie (Quiñónez, 2006).

2.4.3. Incendios de subsuelo

Esta clase de incendios forestales también son llamados incendios subterráneos y avanzan bajo la superficie del suelo, por tanto queman raíces y demás materia orgánica. La localización de estos incendios forestales en ocasiones es dificultosa, ya que su progreso es lento y no se observan llamas ni humo (Quiñónez, 2006).

2.4.4. *Spotting fires*

Como lo indica Malen (2009), los *spotting fires* son focos de fuegos distantes que se originan debido a incendios en los que las ramas y hojas ardientes son arrastradas por grandes distancias, debido a la acción viento o por las explosiones que pueden ocurrir durante la combustión.

2.5. La gran triada

La gran triada son un conjunto de factores que influyen en el comportamiento de los incendios forestales. Estos elementos “son: la topografía (...), la vegetación [o materia combustible] (...) y la meteorología” (Malen, 2009, p. 7).

2.6. Formas de los incendios forestales

Se pueden observar tres formas distintas de propagación de incendios forestales, con base en tres condiciones: la topografía del terreno, el viento y el tipo de combustible.

2.6.1. Forma circular

Los incendios forestales de forma circular, generalmente se desarrollan en “terrenos llanos, con poco viento y cuando el combustible es homogéneo” (Bonilla, 2001, p. 15).

2.6.2. Forma elíptica

Cuando la topografía del lugar, en el que ocurre un incendio forestal, es plana, el viento sopla en una dirección constante y el combustible es homogéneo, probablemente el incendio forestal adquiera forma elíptica (Bonilla, 2001).

2.6.3. Forma irregular

Las condiciones para que los incendios forestales se propaguen de forma irregular son: que el terreno posea pendientes, el viento no tenga una dirección constante y que el lugar contenga diferentes tipos de combustible (Bonilla, 2001).

2.7. Metodologías para la predicción del desarrollo y propagación de incendios forestales

A continuación se describen los diferentes métodos propuestos para el pronóstico de ocurrencia de incendios forestales:

2.7.1. Modelización matemática y estadística

Hoy en día existe una amplia variedad de modelos numéricos utilizados para el pronóstico y simulación del comportamiento de incendios forestales. Estos modelos numéricos pueden predecir cómo y dónde se iniciará el incendio o la forma en que se va a propagar. Sin embargo, Rodríguez (2007) menciona que se necesita de la manipulación de gran cantidad de parámetros, que se encuentran inmersos dentro de los elementos de la gran triada: la pendiente del terreno, los factores meteorológicos y las condiciones del combustible.

2.7.2. Teledetección

El rango de técnicas utilizadas para la prevención, desarrollo y evaluación de los incendios forestales, mediante los datos proporcionados por los satélites de teledetección, es muy amplio.

Actualmente, la teledetección permite detectar la probabilidad de ignición de un incendio; a través de las condiciones hídricas de la materia combustible y de sus propiedades estructurales, la topografía y las condiciones meteorológicas, se puede estimar la propagación del fuego. También, permite detectar el desarrollo de fuegos en los bosques, basándose en el contraste térmico entre el suelo no afectado y el foco de calor.

Asimismo Chuvieco (2009) sostiene que mediante la teledetección se puede analizar el efecto de los incendios forestales, es decir, evaluar las condiciones postincendio a partir de imágenes. Esto, permite determinar de forma más certera los daños del fuego sobre los ecosistemas y la población; e igualmente establecer las condiciones potenciales de regeneración de incendios forestales.

2.7.3. Modelos SIG

Los sistemas de información geográfica (SIG) son de gran ayuda para modelar y predecir incendios forestales. Mediante los diferentes modelos realizados a partir de plataformas SIG, como lo menciona Vilar (2009), se obtienen diferentes mapas *raster* de velocidad de propagación y longitud de llama; dicha información se genera a partir de mapas de pendientes, de tipos de combustibles forestales y de velocidad del viento u otras variables meteorológicas.

2.7.4. Sensores

Una de las herramientas disponibles en la actualidad para detectar la posible ocurrencia de un incendio forestal son los sensores. Estos dispositivos electrónicos poseen ciertas capacidades para la medición de factores físicos. Por tanto, según Valdivia (2013), para la detección de fuegos en los ecosistemas forestales se utilizan los sensores de humedad que miden la humedad absoluta, y los sensores de temperatura, que miden esta ya sea por contacto, es decir, el sensor está en contacto directo con el medio, y sin contacto; en este caso el sensor interpreta la energía radiante de una fuente de calor.

2.8. Índices de riesgo de ocurrencia de incendios forestales

Como se ha mencionado anteriormente, existe una gran cantidad de índices utilizados para la predicción y evaluación de riesgo de incendios forestales alrededor del mundo. A continuación, se presentan los índices que pueden ser adecuados al territorio nacional y así obtener la probabilidad de ocurrencia de un incendio forestal.

2.8.1. Índice de Monte Alegre o Soarez

Este índice es propuesto con base en la similitud de los ecosistemas centroamericanos y sudamericanos, debido a que fue creado para ecosistemas húmedos del sudeste de Brasil. El índice se calcula mediante:

$$FMA = 100 \sum \frac{1}{H}$$

Donde:

FMA = índice de Monte Alegre

H = humedad relativa (%), medida a las 13:00 horas

2.8.2. Índice de Monte Alegre alterado

La expresión del índice de Monte Alegre se modifica de la siguiente forma:

$$FMA+ = \sum_{i=1}^n \left(\frac{100}{H} \right) e^{0,04V}$$

Donde:

FMA+ = índice de Monte Alegre alterado

H = humedad relativa del aire (%), medida a las 13:00 horas

n = número de días sin lluvia \geq a 13 mm

V = velocidad del viento (m/s), medida a las 13:00 horas

e = base del logaritmo natural

Los índices de Monte Alegre y Monte Alegre alterado son coeficientes acumulativos que categorizan el grado de peligro de incendios forestales.

A continuación se presenta la categorización del grado de peligro de incendio forestal, según el valor obtenido del índice de Monte Alegre o Monte Alegre alterado:

Tabla I. **Escala de peligro de incendio forestal**

Valor	Grado de peligro
1,0	Bajo
1,1 – 3,0	Medio
3,1 – 8,0	Alto
8,1 – 20,0	Muy alto
>20,1	Extremo

Fuente: PRADO FAJARDO, María Cristina. *Diseño de un modelo SIG para la determinación de zonas de riesgo por incendios forestales, en los cerros orientales de la ciudad de Bogotá*. p. 61.

Cuando se producen precipitaciones durante el período de observación, los índices de Monte Alegre y Monte Alegre alterado, son corregidos de acuerdo con la precipitación caída, como se muestra en la tabla II.

Tabla II. **Corrección por lluvia**

Valor	Porcentaje de descuento
<2,4	Ninguno
2,5 – 4,9	30
5,0 – 9,9	60
10,0– 12,9	80
>13,0	Recomenzar el acumulativo

Fuente: PRADO FAJARDO, María Cristina. *Diseño de un modelo SIG para la determinación de zonas de riesgo por incendios forestales, en los cerros orientales de la ciudad de Bogotá*. p. 61.

2.8.3. Índice de Chandler

El índice de Chandler es utilizado por el Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica; Guatemala y dicho país comparten similitudes en cuanto al clima y es por ello que se toma en cuenta este índice para el estudio. El índice de Chandler es un valor adimensional que proporciona el riesgo de ocurrencia de un incendio y está definido por la siguiente ecuación:

$$IC = \frac{((110 - 1,373H) - (10,20 - T)) * (124 * 10^{-0,0142H})}{60}$$

Donde:

IC = índice de Chandler

H = humedad relativa (%)

T = temperatura ambiental (°C)

Para evaluar el riesgo de ocurrencia de un incendio forestal mediante este índice, se utiliza la escala que se presenta en la tabla III.

Tabla III. **Escala de riesgo de incendio forestal**

Valor	Riesgo
<50,0	Nulo
50,0 – 74,9	Bajo
75,0 – 89,9	Moderado
90,0 – 97,4	Alto
>97,5	Muy alto

Fuente: Instituto Nacional de Meteorología de Costa Rica. WRF Sarapiquí - Incendios Forestales en Costa Rica. <http://crrh.imn.ac.cr/incendios.html>. Consulta: 11 de septiembre de 2015.

3. METODOLOGÍA

3.1. Variables

Todas las variables mencionadas a continuación fueron recabadas mediante hojas de registro proporcionadas por el Insivumeh. Es importante mencionar que esta institución realiza las mediciones de las condiciones meteorológicas a las 7:00, 13:00 y 18:00 horas, diariamente.

3.1.1. Temperatura

Como producto de la radiación solar, existe un calentamiento del suelo, agua y aire; la magnitud de la cantidad de calor que existe en el ambiente es reflejada mediante la temperatura. Esta variable meteorológica depende de la hora, estación del año, la situación geográfica y de la constitución del suelo (Sánchez, 1990). Se han creado diferentes escalas para medir la temperatura; en Guatemala esta variable se mide y registra en grados Celsius (°C), por tanto esta es la escala que se utilizó.

3.1.2. Temperatura máxima diaria

La temperatura máxima se define como “la temperatura más alta que tiene lugar en cualquier momento de un período de tiempo determinado” (Sánchez, 1990, p. 29). Esta, generalmente se presenta dos o tres horas después del mediodía, cuando el suelo ha absorbido durante varias horas la radiación solar.

Para este estudio, la temperatura máxima se evaluó en un período de 24 horas, es decir, la temperatura más alta registrada durante el día en que ocurrió el evento.

3.1.3. Temperatura de punto de rocío

Esta es la temperatura con la que el vapor de agua contenido en el aire comienza a condensarse dando origen al rocío o niebla (Zúñiga, 2010). Es importante mencionar que la temperatura de punto de rocío no es dependiente de la temperatura ambiental, ya que el rocío se encuentra relacionado con la cantidad de vapor de agua en el aire.

3.1.4. Tensión de vapor

Según Sarochoar (2010, p. 9) la tensión de vapor se define como “la presión que tendría el vapor de agua si ocupara él solo el volumen ocupado por el aire húmedo”. Esta variable se tomó en cuenta, ya que la cantidad de vapor de agua que el aire puede llegar a contener es limitada y cuando se alcanza el límite, el aire se satura, lo que se traduce en que existe mayor humedad en el ambiente. La tensión de vapor se expresa en milímetros de mercurio (mmHg).

3.1.5. Humedad relativa

La humedad relativa es la relación entre la cantidad de vapor de agua que contiene una masa de aire, con la que podría contener si estuviera saturado a la misma temperatura (Zúñiga, 2010). Sus valores son expresados en porcentaje. Esta variable meteorológica fue importante para el estudio, ya que al existir menor cantidad de vapor de agua en el aire, el oxígeno abarca mayor superficie boscosa.

3.1.6. Humedad relativa máxima

Como su nombre lo indica, esta variable meteorológica se define como la humedad relativa más alta registrada durante un período de tiempo determinado. Para este caso en particular, se requirió la humedad relativa máxima de un período de 24 horas, es decir, la humedad relativa más alta que se registró el día en que se produjo el incendio forestal.

3.1.7. Precipitación

“La precipitación es la cantidad de agua [en estado] líquido o sólido que llega desde la atmósfera hasta la superficie terrestre” (Sánchez, 1990, p. 57). En el caso de Guatemala, generalmente la precipitación llega a la superficie en forma líquida; por consiguiente en este estudio la precipitación se refiere a la cantidad de lluvia que alcanza la superficie; y se expresa en milímetros (mm).

Esta variable es importante dentro del estudio, debido a que las precipitaciones, además de que ayudan a que el fuego no se propague, mantienen al material combustible con un alto contenido de humedad y en consecuencia, el tiempo necesario para que el material alcance la temperatura de combustión es mucho mayor.

3.1.8. Radiación solar

Se conoce como radiación solar al flujo de energía proveniente del sol que alcanza la superficie terrestre y se expresa en kilocalorías por centímetro cuadrado por minuto ($\text{kcal/cm}^2/\text{min}$). Esta variable se relaciona con el precalentamiento de los materiales combustibles, que generalmente se da por esta fuente de transmisión de calor.

3.1.9. Insolación

La insolación es la variable meteorológica que se refiere al tiempo en que el sol brilla sobre un determinado lugar de la superficie terrestre (Sánchez, 1990) y se expresa tanto en horas como en porcentaje, durante un lapso de 24 horas. Obviamente, la cantidad de energía proveniente del sol que llega a la superficie de la tierra, se encuentra relacionada con la cantidad de horas que este brille sobre un punto determinado.

3.1.10. Nubosidad

La nubosidad es la fracción de cielo cubierto con nubes, de un lugar en particular. En palabras de Sánchez (1990, p. 53) la nube “es la concentración de las gotas de agua y pequeños cristales de hielo o ambos a la vez, que resultan de la condensación y congelación del vapor de agua del aire”.

La nubosidad se mide en octas, que corresponden a la octava parte de la bóveda celeste; fue utilizada en el estudio, porque impide que la radiación solar llegue de forma directa hasta el material combustible. Cabe mencionar que la insolación depende de esta variable meteorológica.

3.1.11. Viento

El viento es el movimiento horizontal y vertical de grandes masas de aire que rodean la tierra (Sarochar, 2013). Las corrientes de viento son producto de la diferencia de presión y temperatura que se da en la atmósfera. El viento es un vector que presenta dirección y velocidad, que se expresa en kilómetros por hora (km/h). Generalmente debe medirse a 10 metros de altura sobre el nivel del suelo.

Esta variable formó parte de investigación porque acelera la propagación del incendio y también provee oxígeno al mismo.

3.1.12. Presión atmosférica

Esta variable meteorológica no es más que el peso de las masas de aire que rodean el planeta ejercido sobre la superficie terrestre. El Insivumeh la mide en milímetros de mercurio. La presión atmosférica aumenta cuando la temperatura desciende y por tanto existe mayor cantidad de columna de aire sobre la superficie terrestre, provocando que la humedad circundante se eleve; por tanto, permite mantener los combustibles vegetales más húmedos.

3.1.13. Delimitación del campo de estudio

Esta investigación propone un modelo numérico basado en determinados parámetros meteorológicos (temperatura y humedad relativa), para develar e identificar zonas potenciales de desarrollo de incendios forestales. Por lo tanto, el área de la investigación pertenece a las ciencias naturales y exactas.

De forma más concreta, el campo de la investigación se define dentro de las ciencias formales, específicamente matemática y estadística; en este caso se enfocan al desarrollo de un modelo numérico para la predicción de incendios forestales.

3.2. Recursos humanos disponibles

- Investigador: Rubí Abigail Gómez Córdova
- Asesor: Ing. Walter Arnoldo Bardales Espinoza
- Personal del Sipecif: Ing. Adolfo García

3.3. Recursos materiales disponibles

- Automóvil para trasladarse hacia el Insivumeh
- Combustible
- Computadora
- Hojas de cálculo de Excel
- Software de sistema de información geográfica ArcGIS
- Hojas de registro de información meteorológica
- Software estadístico SPSS
- Lapicero
- Hojas de papel bond

3.4. Técnica cuantitativa

Esta investigación se realizó con la base de datos de los incendios que ocurrieron dentro del territorio nacional durante el período del 2001 al 2013; la misma fue creada por el Sipecif y proporciona los siguientes datos:

- Temporada en que ocurre el incendio
- Número de boleta de reporte del incendio
- Nombre y apellido de la persona que reporta el incendio
- Fecha del incendio
- Institución que reporta el siniestro
- Forma en que se reporta el incendio (teléfono, radio, entre otros)
- Departamento
- Municipio
- Aldea o caserío
- Finca

- Latitud
- Longitud
- Causas del incendio
- Llegada de medios aéreos
- Hora de inicio del incendio
- Fecha y hora de control del incendio
- Fecha y hora de extinción del incendio
- Fecha y hora de envío de boleta
- Tipo de incendio (forestal o no forestal)
- Superficie total afectada
- Superficie forestal afectada
- Superficie no forestal afectada
- Superficie mixta afectada
- Superficie de bosque de coníferas afectada
- Superficie de bosque de latifolias afectada
- Superficie de área no protegida afectada

Figura 2. Ejemplo base de datos de incendios forestales

Cuenta de Incendio Forestal		Etiquetas de columna												
Etiquetas de fila	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	Total general
Alta Verapaz	25	17	18				3	10	5	12	30	15	18	153
Baja Verapaz	123	86	52	49	109	75	102	73	71	61	84	56	73	1014
Chimaltenango	36	89	17	14	99	44	57	74	60	43	48	26	32	639
Chiquimula	92	45	13	21	64	48	59	21	18	35	24	32	28	500
El Progreso	41	25	24	6	23	24	28	31	18	17	28	15	24	304
Escuintla	2	10	1	5	1	1			1				1	22
Guatemala	103	65	26	44	49	63	62	59	36	26	12	14	24	583
Huehuetenango	27	54	33	16	39	51	56	44	53	26	36	30	33	498
Izabal	4	1	4	1	1		5							16
Jalapa	70	75	66	79	97	130	121	86	79	45	87	43	45	1023
Jutiapa	14	15	8	5	5	10	2	16	11		2	8	5	101
Petén	23	72	220	5	87	30	85	44	93	48	111	75	23	916
Quetzaltenango	47	74	43	24	42	48	29	22	36	16	28	11	22	442
Quiché	88	163	79	23	94	78	73	85	56	74	131	78	93	1115
Retalhuleu			1							1				2
Sacatepéquez	20	10	7	8	35	25	25	32	19	18	16	7	24	246
San Marcos	14	19	17	10	2	35	37	33	30	16	20	8	2	243
Santa Rosa	17	15	11	13	4	14	4	1		4	1	4	1	89
Sololá	92	63	44	57	56	37	23	31	32	18	35	25	42	555
Suchitepéquez		1			1				1					3
Totonicapán	32	25	11	23	93	60	48	46	84	45	31	20	49	567
Zacapa	48	65	31	37	46	54	50	39	52	42	40	25	48	577
Total general	918	989	726	440	947	827	869	747	755	547	764	493	586	9608

Fuente: archivo de la base de datos del Sistema Nacional de Prevención y Control de Incendios Forestales.

También se requirió la información de las condiciones meteorológicas registradas el día en que sucedió cada incendio forestal. Dichos datos se obtuvieron mediante las hojas de registro de las variables meteorológicas que el Insivumeh mide diariamente.

Figura 3. Ejemplo de formato de registro de las variables meteorológicas

Pluviosidad
Temperatura
Velocidad
Humedad

INSIVUMEH
SECCION DE CLIMATOLOGIA
TEMPERATURA °C

CLAVE B.141 LATITUD 14°52'10" LONGITUD 91°30'52" ELEV. 2454 MSNM

ESTACION Lalob Oralle DEPTO Quetzaltenango MUNIC. Olintepeque

NOMBRE DEL OBSERVADOR Jaime Palacios - Brantelina Asa MES Diciembre AÑO 2003

DIA	7 HORAS		13 HORAS		18 HORAS		TEMP MEDIA	TEMP MAXIMA	TEMP MINIMA	OSCIL.
	SECO	HUMEDO	SECO	HUMEDO	SECO	HUMEDO				
1	7.2	7.0	19.2	12.6	14.6	11.0	13.7	20.4	4.4	16.0
2	11.6	10.4	19.2	12.2	12.8	9.8	14.5	19.2	11.0	7.0
3	2.0	1.8	21.2	14.6	14.8	12.2	12.7	21.2	0.4	20.8
4	6.0	5.8	17.0	12.0	13.4	10.4	12.1	21.0	2.0	19.0
5	2.4	2.2	21.2	13.2	13.2	10.2	12.3	21.2	0.2	20.3
6	7.2	6.2	16.8	11.4	12.0	8.6	12.0	18.2	6.2	12.0
7	1.8	1.4	16.0	10.8	11.6	10.6	9.9	17.2	0.6	16.6
8	3.4	3.2	20.0	12.6	12.2	9.4	11.9	20.0	2.0	17.6
9	0.4	0.2	22.8	11.2	14.8	7.8	12.7	23.4	0.0	23.4
10	-2.4	-2.4	20.8	11.6	13.0	9.6	10.5	20.8	-3.5	24.3
11	0.0	0.0	21.8	11.8	14.2	12.0	12.0	22.2	-2.2	24.4
12	-1.2	-1.6	23.2	11.6	14.4	12.2	12.1	22.2	-2.6	24.7
13	3.4	2.2	21.0	14.8	14.6	12.4	12.7	21.0	0.8	20.2
14	3.8	2.6	16.6	11.2	13.2	10.6	10.9	18.2	2.2	16.0
15	4.2	4.0	23.6	15.4	15.4	11.8	14.4	22.8	1.8	21.0
16	7.0	6.8	19.4	14.4	14.2	12.6	13.5	22.0	2.0	20.0
17	12.4	12.2	13.8	10.2	10.4	7.4	12.2	14.4	11.0	3.4
18	9.4	9.2	21.2	13.4	12.8	10.4	14.5	20.8	5.8	15.0
19	9.8	9.6	15.0	11.4	11.2	8.6	12.0	16.3	8.6	7.7
20	2.0	1.6	19.2	11.4	10.4	7.0	10.5	19.0	1.5	17.5
21	-3.2	-1.6	17.8	10.4	10.2	7.8	8.3	17.7	-4.0	21.7
22	4.8	4.2	20.0	13.0	13.0	9.8	12.6	20.8	0.0	20.8
23	3.2	3.0	21.0	13.2	16.0	10.4	13.4	22.3	1.5	20.8
24	6.8	6.0	21.6	13.2	13.8	10.8	14.1	20.4	6.5	13.9
25	5.0	—	19.0	—	10.0	—	11.3	19.2	4.8	14.4
26	0.0	-0.2	21.4	14.2	15.2	12.8	12.2	22.4	-1.0	23.4
27	11.4	1.2	22.4	11.8	15.4	10.8	13.1	22.4	0.6	21.8
28	-1.2	-1.4	22.2	12.4	14.4	12.4	11.8	22.8	-1.4	24.2
29	6.0	5.6	18.0	13.4	14.6	12.6	12.9	20.8	5.6	15.2
30	11.4	11.2	19.2	12.4	12.4	9.2	14.3	18.4	9.4	9.0
31	7.4	7.2	20.4	13.6	13.0	12.8	13.6	21.2	6.2	15.0
MED							12.4	20.4	2.5	17.8
MIN								23.4	-4.0	
MAX										

OBSERVACIONES: _____

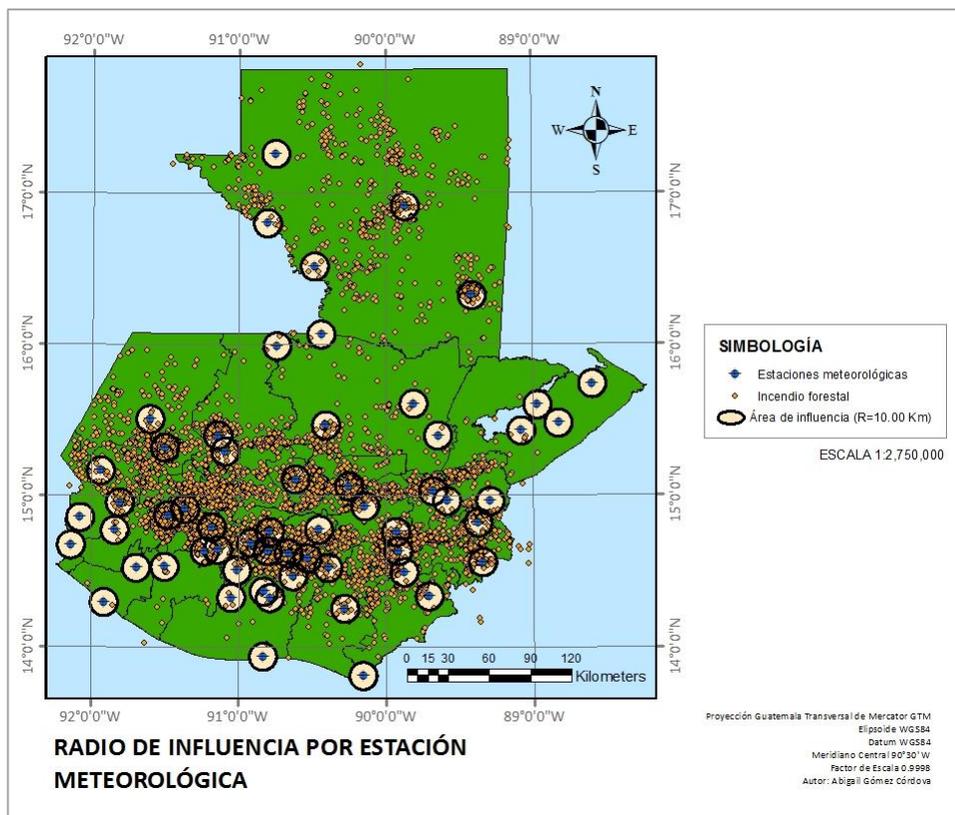
Fuente: Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología.

3.5. Recolección y ordenamiento de la información

Para el ordenamiento de la información básicamente se relacionaron los registros de incendios forestales de la base de datos creada en el sistema de información geográfica por el Sipecif, con las estaciones meteorológicas del Insivumeh. Para ello se realizaron las siguientes acciones:

- Utilizando ArcGIS, se trazó un *buffer* de 10,00 kilómetros para cada estación meteorológica.

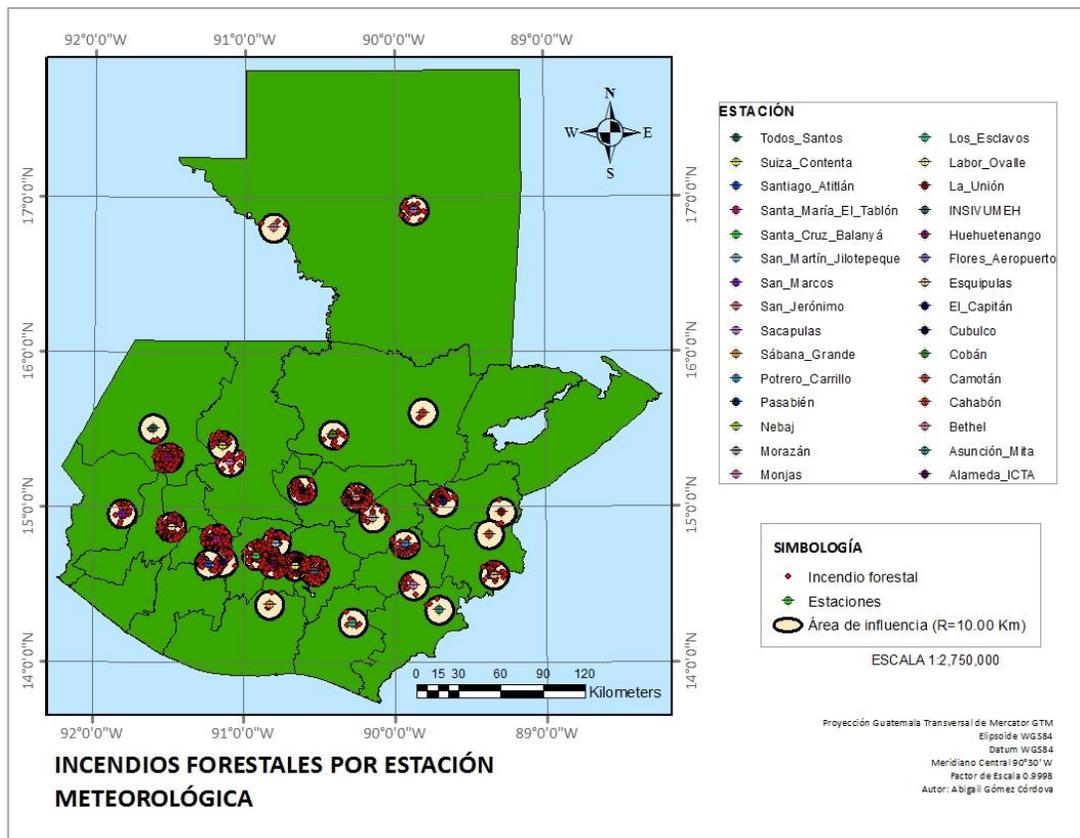
Figura 4. Radio de influencia de cada estación meteorológica



Fuente: elaboración propia, utilizando ArcGIS 10.2.2.

- Se seleccionaron los registros de incendios forestales que se encontraban dentro del radio de influencia de la estación meteorológica.
- Se realizó el paso anterior para cada estación meteorológica.

Figura 5. **Incendios forestales dentro del área de influencia de cada estación meteorológica**



Fuente: elaboración propia, utilizando ArcGIS 10.2.2.

- Para cada uno de los incendios forestales que se encuentran dentro del área de influencia de las estaciones meteorológicas, se anotó la fecha y hora en que ocurrió el incendio forestal en hojas de cálculo de Excel.

- Luego, se buscaron las hojas de registro de las condiciones meteorológicas, del día en que se dio el incendio forestal.
- Se apuntaron los datos de las variables meteorológicas tomadas a la hora más próxima en la que se desarrolló el incendio forestal.
- Se repitieron los pasos dos pasos anteriores para cada incendio forestal que se generó dentro del horario recurrente.

3.6. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

Básicamente se asignaron en cada estación meteorológica, todos los incendios forestales que ocurrieron dentro de su radio de influencia, indicando la fecha y hora a la que se dieron los eventos.

Además, a los registros de los incendios forestales que se desarrollaron dentro del horario recurrente, se les agregó la información de las condiciones meteorológicas registradas durante el día en que se generó cada evento. La información se digitalizó y sistematizó a través del cuadro expuesto en el apéndice 3.

Por otro lado, los datos extraídos de la base de datos de incendios forestales que maneja el Sipecif, se procesaron como se muestra en las siguientes tablas:

Tabla IV. **Cantidad de incendios forestales según tipo de superficie afectada, durante el periodo 2001-2013**

Año	Tipo de superficie afectada			Total de incidentes
	Forestal	No forestal	Mixta	
2001	658	2	167	827
2002	729	3	185	917
2003	445	2	201	648

Continuación de la tabla IV.

2004	295	0	107	402
2005	722	0	166	888
2006	619	9	135	763
2007	642	3	175	820
2008	544	6	145	695
2009	608	6	104	718
2010	465	18	64	547
2011	546	11	89	646
2012	396	12	72	480
2013	490	6	59	555
Total	7 159	78	1 669	8 906

Fuente: elaboración propia.

Tabla V. **Cantidad de incendios forestales y superficie afectada, durante el período 2001-2013**

Año	Núm. de incidentes	Tipo de superficie afectada (ha)		Total (ha)
		Forestal	No forestal	
2001	827	18 636,17	3 360,96	21 997,13
2002	917	17 887,80	4 449,57	22 337,37
2003	648	59 824,23	22 512,98	82 337,21
2004	401	6 607,67	760,06	7 367,73
2005	886	34 157,12	58 397,33	92 554,45
2006	763	12 385,74	1 998,83	14 384,57
2007	820	18 766,73	18 381,26	37 147,99
2008	695	10 972,64	12 190,02	23 162,66
2009	718	12 939,25	3 435,36	16 374,60
2010	547	7 234,69	1 907,03	9 141,72
2011	647	13 302,14	3 199,40	16 501,54
2012	480	5 360,98	803,61	6 164,59
2013	557	10 440,53	676,71	11 117,24
Total	8 906	228 515,69	132 073,11	360 588,80

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **Cantidad y tipo de superficie forestal afectada, durante el período 2001-2013**

Año	Tipo de superficie forestal afectada (ha)			Total (ha)
	Área no protegida	Bosque de coníferas	Bosque latifoliado	
2001	14 014,83	3 582,25	1 039,09	18 636,17
2002	12 391,34	4 947,23	549,23	17 887,80
2003	10 217,60	49 247,74	358,89	59 824,23
2004	4 292,68	2 175,29	139,70	6 607,67
2005	8 906,97	25 112,09	138,06	34 157,12
2006	9 609,11	2 347,94	428,69	12 385,74
2007	9 708,46	8 850,71	207,56	18 766,73
2008	8 701,75	1 892,51	378,38	10 972,64
2009	6 957,08	5 884,07	98,10	12 939,25
2010	4 947,18	1 760,13	527,38	7 234,69
2011	5 747,34	7 231,76	323,04	13 302,14
2012	3 811,12	1 462,77	87,08	5 360,98
2013	6 992,64	3 289,10	158,80	1 0440,53
Total	106 298,11	117 783,58	4 434,00	228 515,69

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Cantidad de incendios forestales y superficie afectada por departamento, durante el período 2001-2013**

Departamento	Núm. de incidentes	Tipo de superficie afectada (ha)		Total (ha)
		Forestal	No forestal	
Alta Verapaz	138	2 211,44	950,45	3 161,89
Baja Verapaz	917	13 409,77	2 169,74	15 579,51
Chimaltenango	634	8 479,74	149,63	8 629,37
Chiquimula	486	11 932,48	866,08	12 798,56
El Progreso	259	6 854,93	641,29	7 496,22
Escuintla	16	774,05	734,56	1 508,61
Guatemala	531	5 128,53	1 159,97	6 288,50
Huehuetenango	487	5 552,07	402,58	5 954,65
Izabal	12	351,01	455,03	806,04
Jalapa	929	16 978,16	2 683,29	19 661,45
Jutiapa	89	2 661,58	616,51	3 278,10
Petén	690	92 715,64	114 713,74	20 7429,38
Quetzaltenango	391	2 850,98	616,78	3 467,76
Quiché	1 098	17 290,33	1 673,07	18 963,40
Retalhuleu	2	137,50	0,00	137,50

Continuación de la tabla VII.

Sacatepéquez	232	1 724,59	313,88	2 038,47
San Marcos	240	1 525,90	132,65	1 658,55
Santa Rosa	85	4 687,60	545,50	5 233,10
Sololá	535	3 908,17	529,93	4 438,10
Suchitepéquez	3	11,20	0,00	11,20
Totonicapán	563	4 479,62	133,23	4 612,85
Zacapa	569	24 850,40	2 585,20	27 435,60
Total	8 906	228 515,69	132 073,11	360 588,80

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Cantidad y tipo de superficie forestal afectada por departamento, durante el período 2001-2013**

Departamento	Tipo de superficie forestal afectada (ha)			Total (ha)
	Área no protegida	Bosque de coníferas	Bosque latifoliado	
Alta Verapaz	1 754,35	282,59	174,50	2 211,44
Baja Verapaz	12 031,56	911,48	466,72	13 409,77
Chimaltenango	7 356,78	585,81	537,15	8 479,74
Chiquimula	11 641,39	79,89	211,20	11 932,48
El Progreso	4 336,26	2 330,74	187,93	6 854,93
Escuintla	420,05	350,00	4,00	774,05
Guatemala	4 385,74	525,35	217,44	5 128,53
Huehuetenango	5 298,15	107,95	145,97	5 552,07
Izabal	348,01	0,00	3,00	351,01
Jalapa	16 708,56	224,55	45,05	16 978,16
Jutiapa	2 260,62	348,96	52,00	2 661,58
Petén	3 882,54	87 783,50	1 049,60	92 715,64
Quetzaltenango	1 489,96	1 298,67	62,35	2 850,98
Quiché	16 109,05	427,31	753,97	17 290,33
Retalhuleu	137,50	0,00	0,00	137,50
Sacatepéquez	776,82	791,54	156,23	1 724,59
San Marcos	1 432,96	89,55	3,40	1 525,90
Santa Rosa	4 492,90	0,00	194,70	4 687,60
Sololá	782,68	3 119,49	6,00	3 908,17
Suchitepéquez	0,00	11,20	0,00	11,20
Totonicapán	4 058,23	306,10	115,29	4 479,62

Continuación de la tabla VIII.

Zacapa	6 594,00	18 208,90	47,50	24 850,40
Total	106 298,11	117 783,58	4 434,00	228 515,69

Fuente: elaboración propia.

3.7. Análisis estadístico

Para trazar el modelo numérico de predicción de zonas potenciales de desarrollo de incendios forestales se utilizaron métodos estadísticos paramétricos, teoría de conjuntos y análisis booleano.

3.7.1. Análisis probabilístico booleano

El análisis de probabilidad asociado al álgebra de Boole, mide el grado de ocurrencia de los sucesos para este estudio sobre incendios forestales; son los resultados posibles que pueden obtenerse a partir de una operación que se repite bajo idénticas condiciones (experimento aleatorio); en el presente caso, la relación de los factores meteorológicos.

Para llevar a cabo el análisis booleano se deben verificar las siguientes condiciones:

- El complementario (\bar{A}) de un suceso A que pertenece al álgebra booleana (A) también pertenece al álgebra:

$$A \in A \rightarrow \bar{A} \in A$$

- Si se tiene una serie de sucesos finitos (A_1, A_2, \dots, A_n), infinitos numerales que pertenecen a \mathcal{A} , la unión de todos ellos tiene que pertenecer a \mathcal{A} :

$$A_1, A_2, \dots, A_n \in \mathcal{A} \rightarrow A \cup A_2 \cup \dots \cup A_n \in \mathcal{A}$$

- El suceso imposible también pertenece al \mathcal{A} :

$$\emptyset \in \mathcal{A}$$

Además, los siguientes axiomas deben ser verificados en la probabilidad (P) asociada al álgebra booleana:

- Axioma 1: la probabilidad siempre es positiva.

$$P : \mathcal{A} \rightarrow [0,1] \subset \mathbf{R}$$

$$A \in \mathcal{A} \rightarrow 0 \leq P[A] \leq 1$$

- Axioma 2: la probabilidad del espacio muestral (E) siempre estará entre 0 y 1.

$$P[E] = 1$$

- Axioma 3: sea $A_1 \dots A_n$ sucesos tales que son disjuntos dos a dos $A_i \cap A_j = \emptyset$, la probabilidad es la suma de todas las probabilidades de sucesos.

$$P(\cup A_i) = \sum P(A_i)$$

Todo esto se generará al tomar en cuenta solamente un espacio muestral, el cual encierra todos los sucesos elementales del experimento aleatorio. Pero cuando se conoce un determinado suceso ocurrido, generalmente se modifica la probabilidad de que ocurra otro suceso.

Entonces, cuando un suceso B pertenece al álgebra de Boole, y $P(B) \neq 0$, la probabilidad de que A ocurra, habiendo ocurrido B, se define:

$$P(B/A) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)} \text{ si } P(B) \neq 0$$

De manera análoga se define $P(A/B)$, y con base en esto, se deducen las siguientes relaciones:

- $P(A \cap B) = P(A) \cdot P(B/A)$
- $P(A \cap B) = P(B) \cdot P(A/B)$
- $P(A/B) \cdot P(B) = P(B/A) \cdot P(A)$
- $P(A/B)/P(B/A) = P(A)/P(B)$
- $P(A/A) = 1$

Si A, B son independientes $P(A \cap B) = P(A) \cdot P(B)$, entonces:

$$P(A/B) = P(B/A) = P(B)$$

Para un número n de sucesos, se aplica la regla de la multiplicación:

$$P(A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_n) = P(A_1)P(A_2/A_1) \dots P(A_n/A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_{n-1})$$

Las relaciones y condicionantes expuestas anteriormente son las que permitieron analizar los datos y se tomaron en cuenta durante el desarrollo de los modelos numéricos, que propone la investigación. Es importante mencionar que este análisis fue realizado por medio del software SPSS.

3.7.2. Análisis de correlación lineal

El análisis de correlación se utiliza para medir el grado o intensidad de asociación entre dos o más variables. El concepto de correlación está estrechamente vinculado al de regresión, pues, para que una ecuación de regresión sea razonable, los puntos muestrales deben estar ajustados a la ecuación de regresión.

El coeficiente de correlación lineal es un número que indica el grado o intensidad de asociación entre las variables “x” y “y”. Su valor varía entre -1 y +1.

$$-1 \leq r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) * (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 * \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \leq +1$$

- Si $r = -1$, la asociación es perfecta pero inversa
- Si $r = +1$, también la asociación es perfecta pero directa
- Si $r = 0$, no existe asociación lineal entre las variables

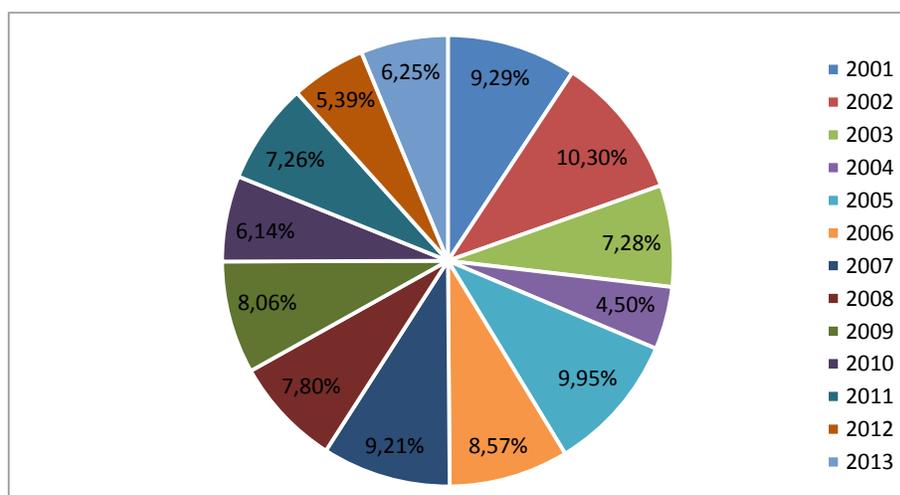
Para el caso en estudio, los parámetros de ajuste de humedad fueron condicionantes para la elaboración del modelo, por tanto fue necesario revisar la mejor correlación para tres variables de cada modelo numérico planteado; para esto se requirió utilizar el software estadístico SPSS.

4. RESULTADOS

4.1. Cantidad de incendios forestales desarrollados durante el período del 2001 al 2013

Según datos del Instituto Nacional de Bosques, durante el período comprendido entre el 2001 y 2013 ocurrieron en total 8 906 incendios forestales. A través de la figura 6 se puede observar que durante el 2002 se generó la mayor cantidad de incendios forestales, los cuales ascienden al 10,30 % de los siniestros; consecutivamente se encuentran los años 2005 (9,95 %), 2001 (9,29 %) y 2007 (9,21 %). Por otro lado, el 2012 presenta la menor cantidad de incendios, equivalentes al 5,39 % de los incidentes.

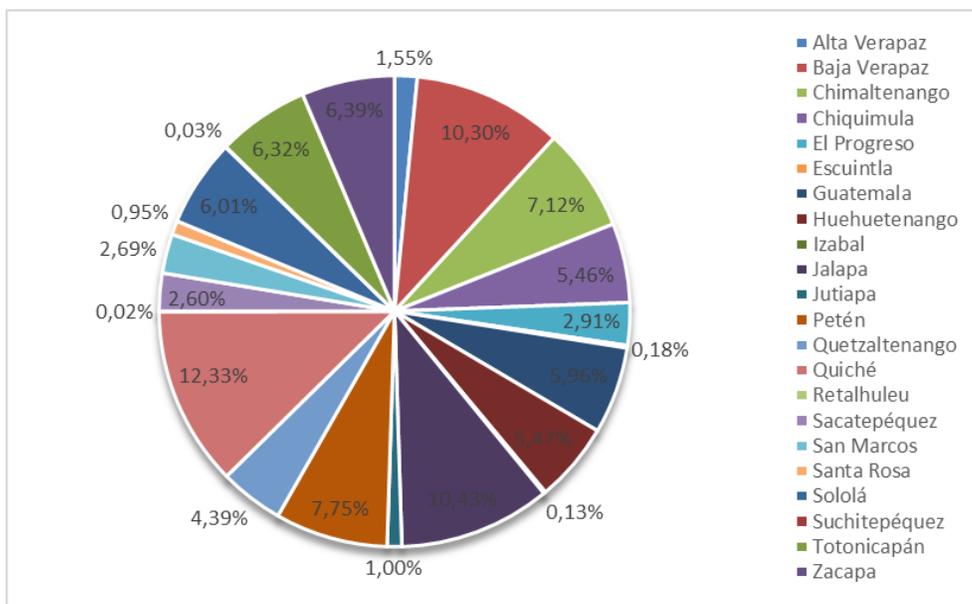
Figura 6. Incendios forestales registrados por año, durante el período 2001-2013



Fuente: elaboración propia, utilizando Excel 2013.

En la siguiente gráfica es posible notar que el mayor porcentaje de los incendios forestales desarrollados durante el 2001 al 2013, le corresponden al departamento de Quiché (12,33 %). Asimismo, se observa que estos eventos también fueron recurrentes en los departamentos de Jalapa y Baja Verapaz, con un porcentaje de incendios generados del 10,43 % y 10,30 %, respectivamente.

Figura 7. **Incendios forestales registrados por departamento, durante el período 2001-2013**

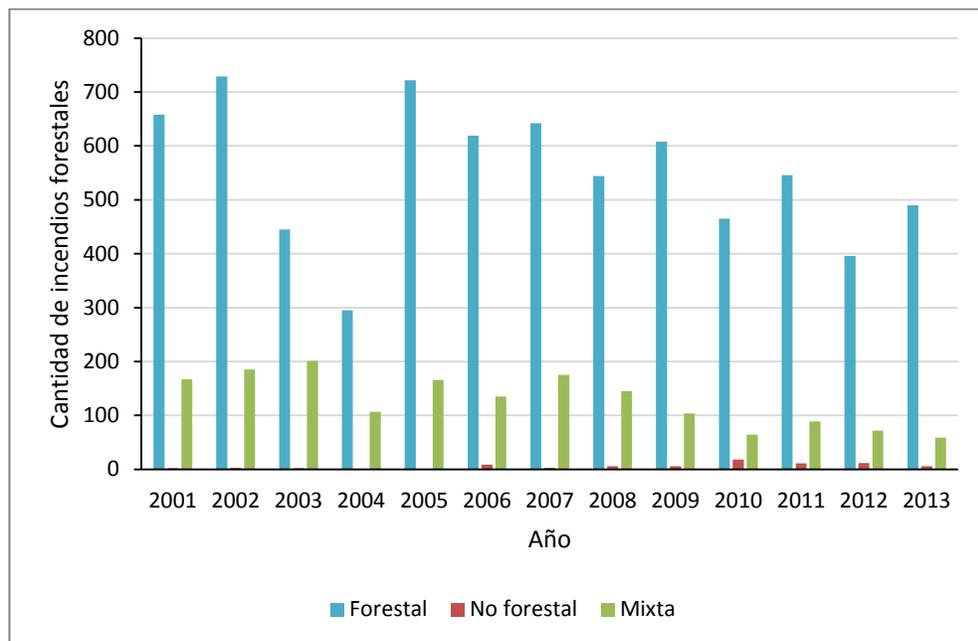


Fuente: elaboración propia, utilizando Excel 2013.

A partir de la figura 8, que a continuación se muestra, se hace evidente que la mayoría de los incendios forestales que ocurrieron entre el 2001 y 2013 afectaron áreas boscosas. Estos incidentes ascienden al 80,38 % y dejaron como consecuencia grandes extensiones de superficie forestal dañada; también

se puede calcular que el 18,74 % de los incendios forestales afectaron área mixta y tan solo el 0,88 % afectaron, propiamente, superficie no forestal.

Figura 8. Tipo de superficie afectada según la cantidad de incendios forestales registrados durante el período 2001-2013

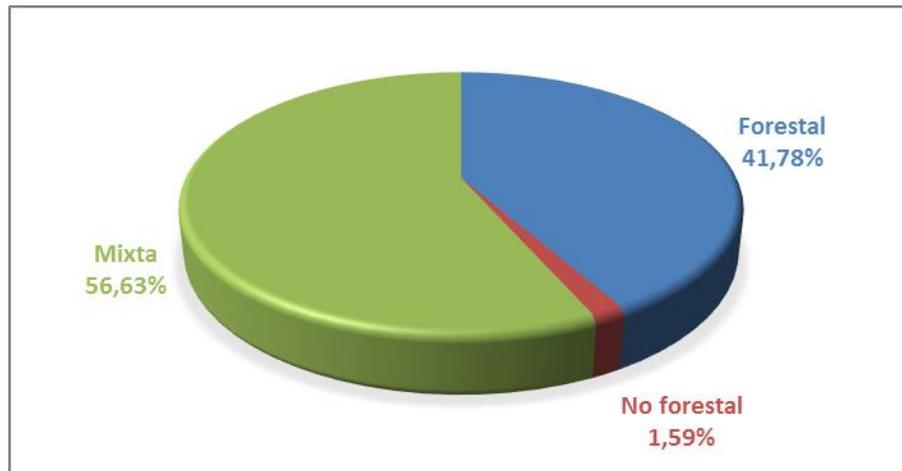


Fuente: elaboración propia, utilizando Excel 2013.

4.2. Superficie afectada por los incendios forestales registrados durante el período 2001-2013

Como consecuencia de los incendios forestales ocurridos entre el 2001 y el 2013, aproximadamente 360 589 hectáreas resultaron afectadas; el 41,78 % de las mismas pertenece a superficie forestal y el 1,59 % a superficie no forestal. Mientras que el 56,63 % restante, se dio tanto en área forestal como no forestal. Todo lo anterior, se puede observar claramente en la figura 9.

Figura 9. **Superficie afectada por los incendios forestales ocurridos durante el período 2001-2013**

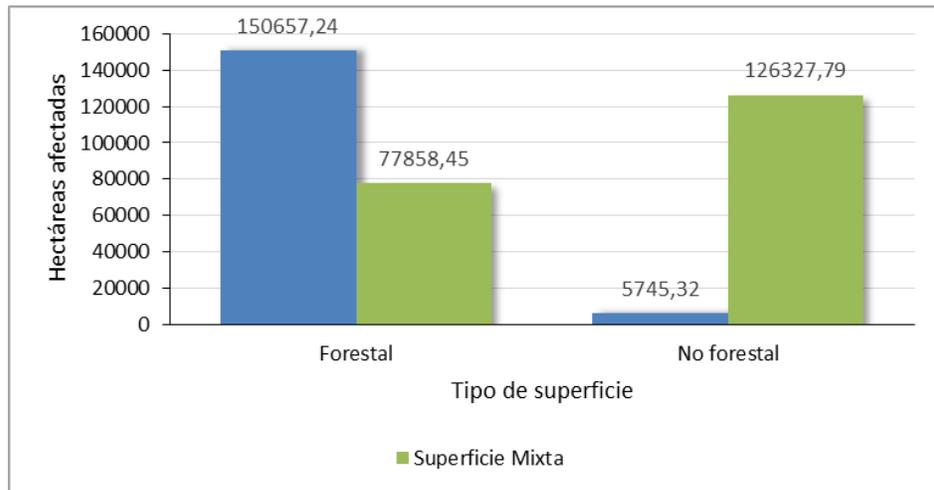


Fuente: elaboración propia, utilizando Excel 2013.

Ahora bien, a través de la figura 10, se estimó que del área mixta afectada, el 61,87 % es superficie no forestal y por tanto el 38,13 % es de superficie boscosa. También mediante este gráfico se determinó que el área no forestal afectada es de 132 073 hectáreas y la cobertura forestal que se perdió, incluyendo el área perjudicada por los incendios que dañaron área mixta, asciende a 228 516 hectáreas, es decir 1,7 veces más que la superficie no forestal damnificada.

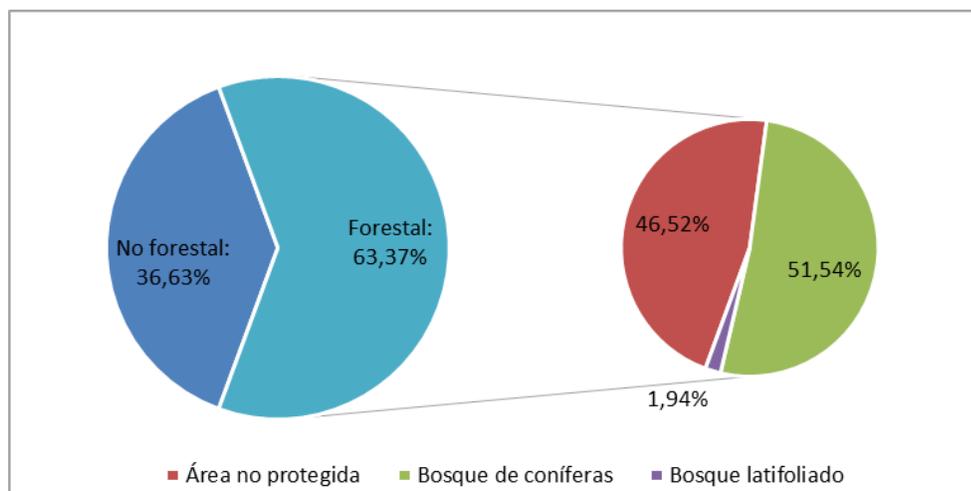
De igual forma, la figura 11 reitera lo mencionado anteriormente, ya que en la misma se establece que el 63,33 % de las hectáreas perjudicadas por los incendios forestales son de áreas con bosque y el 36,67 % restante es de superficie no forestal. Asimismo, la figura hace notar que de las hectáreas de bosque en las que se produjo daño, un 51,54 % es de latifoliadas y el 1,54 % de coníferas; mientras que el 46,52 % corresponde a áreas no protegidas.

Figura 10. **Superficie forestal y no forestal afectada por los incendios forestales ocurridos durante el período 2001-2013**



Fuente: elaboración propia, utilizando Excel 2013.

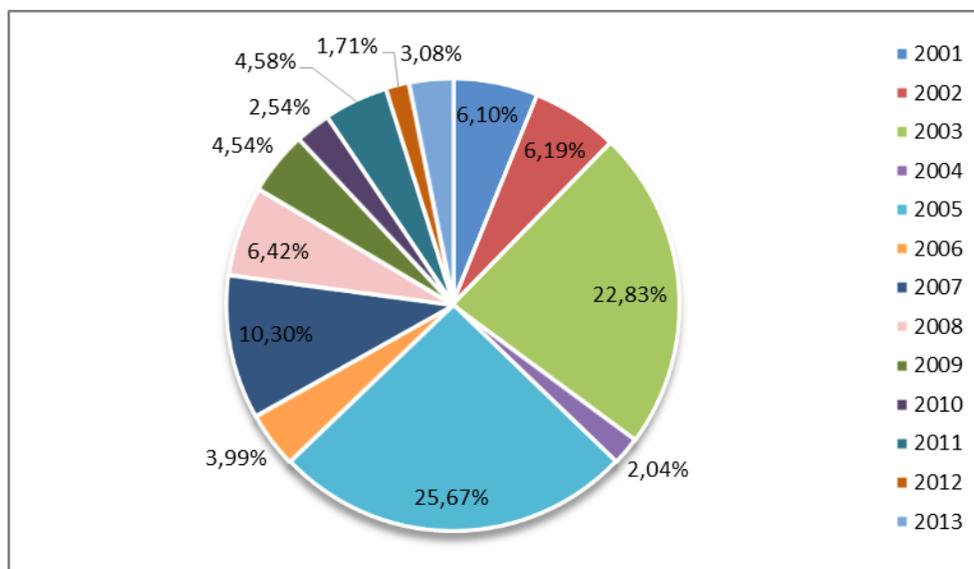
Figura 11. **Tipo de superficie afectada por los incendios forestales ocurridos durante el período 2001-2013**



Fuente: elaboración propia, utilizando Excel 2013.

Con respecto a la figura 12 se puede manifestar que, contrariamente a que durante el 2002 se suscitó la mayor cantidad de incidentes, el área afectada por los mismos fue solamente el 6,19 % de las 360 589 hectáreas dañadas durante los 12 años examinados. Mientras tanto, el 2005 ocupa el primer lugar en cuanto a cantidad de superficie afectada por los incendios forestales (25,67 %) y en cuanto a la cantidad de siniestros ocurridos ocupa el segundo lugar, como ya se ha mencionado anteriormente.

Figura 12. **Cantidad de hectáreas afectadas por año, durante el período 2001-2013**



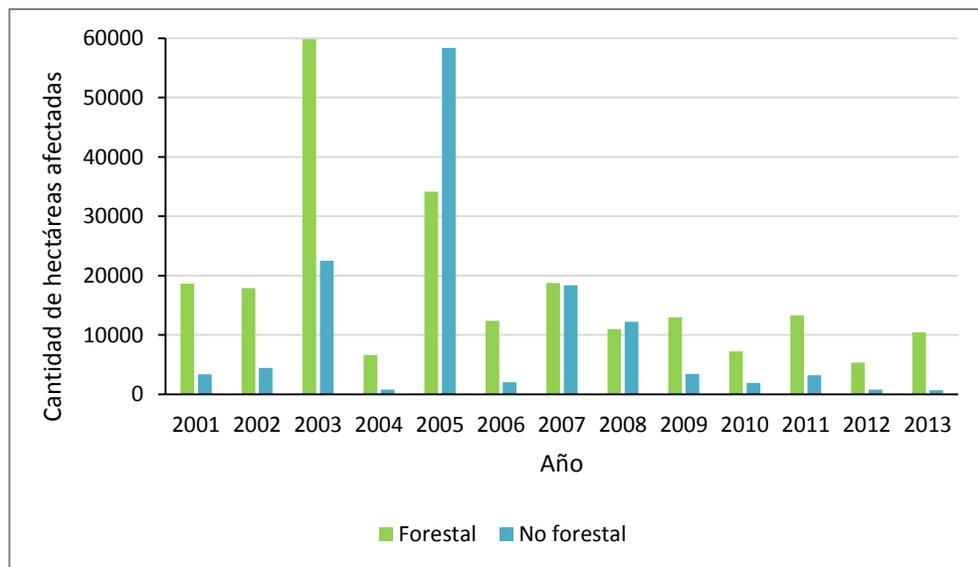
Fuente: elaboración propia, utilizando Excel 2013.

A pesar que en el 2003 se generó el 7,28 % de incendios forestales, la superficie dañada por estos fue del 22,83 %, para ese año. Seguidamente, durante el 2007 se dañó un 10,30 % de hectáreas como consecuencia de los incendios forestales, año que se encuentra entre los primeros cuatro lugares en cuanto a incidentes suscitados.

En contraste con todo ello, el 2012 fue el año que menos superficie dañada registra (1,71 %), y de igual forma, durante este año se suscitó la menor cantidad de incendios forestales (5,39 %).

En cuanto al tipo de superficie que se vio afectada anualmente, en la figura siguiente, claramente se aprecia que durante el 2005, se deterioró la mayor cantidad de superficie no forestal; la suma asciende a 58 397 hectáreas (63,10 %); en contraste con las 34 157 hectáreas (36,90 %) de área boscosa damnificada.

Figura 13. **Cantidad y tipo de superficie afectada por año, durante el período 2001-2013**



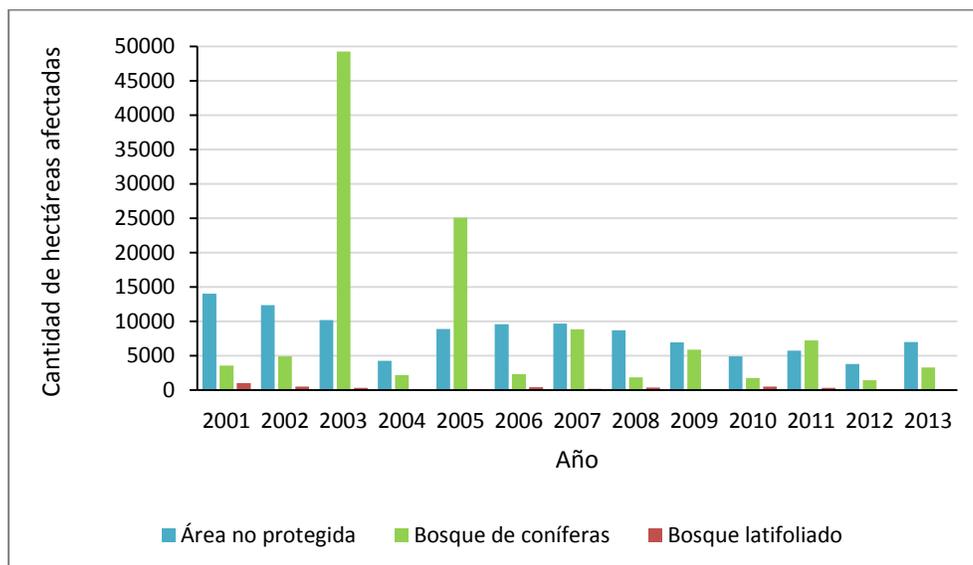
Fuente: elaboración propia, utilizando Excel 2013.

Por el contrario en el 2003 una extensión de 59 824 hectáreas (72,66 %) de bosque se vieron perjudicadas y un total de 22 514 hectáreas (27,34 %) de área no forestal sufrieron daño.

En lo que respecta al año 2007, la cantidad de ambos tipos de superficie afectada muestra una cantidad similar, ya que se perdieron 18 766 hectáreas (50,52 %) de cobertura forestal y 18 381 hectáreas (49,48 %) de superficie no forestal.

A continuación se presenta la figura 14; con base en la misma es fácil determinar que, en cuanto al tipo de superficie forestal damnificada por los incendios, principalmente el bosque de coníferas, ha sido el más dañado; tan solo en el 2003 se dañaron alrededor de 49 248 hectáreas del mismo, equivalentes al 82,32 % de toda la superficie con bosque perjudicada durante dicho año. Además, en la figura 15 se observa que estas cifras equivalen el 41,81 % en relación con todos los años examinados.

Figura 14. **Cantidad y tipo de superficie forestal afectada por año, durante el período 2001-2013**

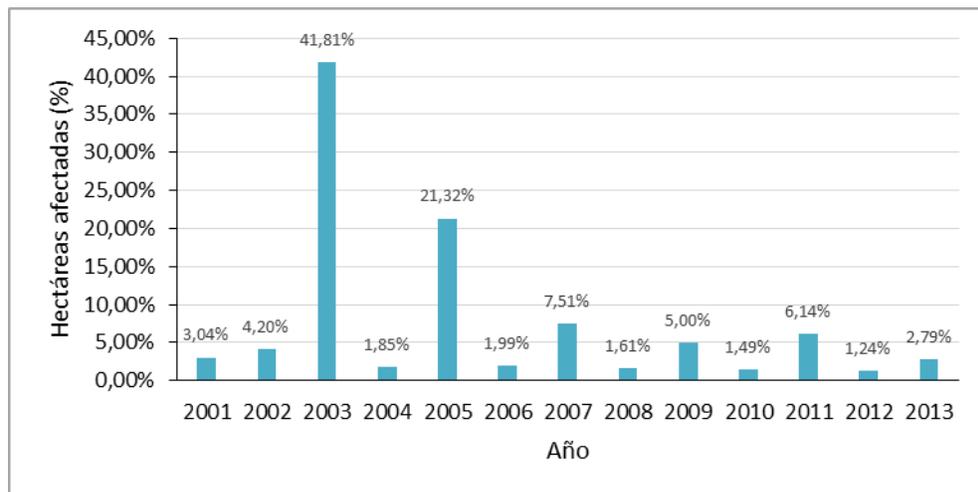


Fuente: elaboración propia, utilizando Excel 2013.

Durante el 2005 se vieron perjudicadas 25 112 hectáreas más, es decir el 73,52 % de cobertura forestal afectada durante ese año y el 21,32 % respecto de todos los demás años. En cambio, durante el 2012, únicamente se deterioraron 1,24 % hectáreas de bosque de coníferas, siendo este el porcentaje más bajo comprendido entre los años 2001 al 2013.

Igualmente, se hace notorio que el bosque de latifoliadas ha sido el menos damnificado por los incendios forestales; si se analiza la superficie forestal total afectada por cada año, el 2010 posee el porcentaje más alto de pérdida de este tipo de bosque (7,29 %), consecutivamente se encuentra el 2001 con un 5,58 %. Para el resto de cada uno de los años observados, el bosque latifoliado que se perdió fue menor al 3,00 %.

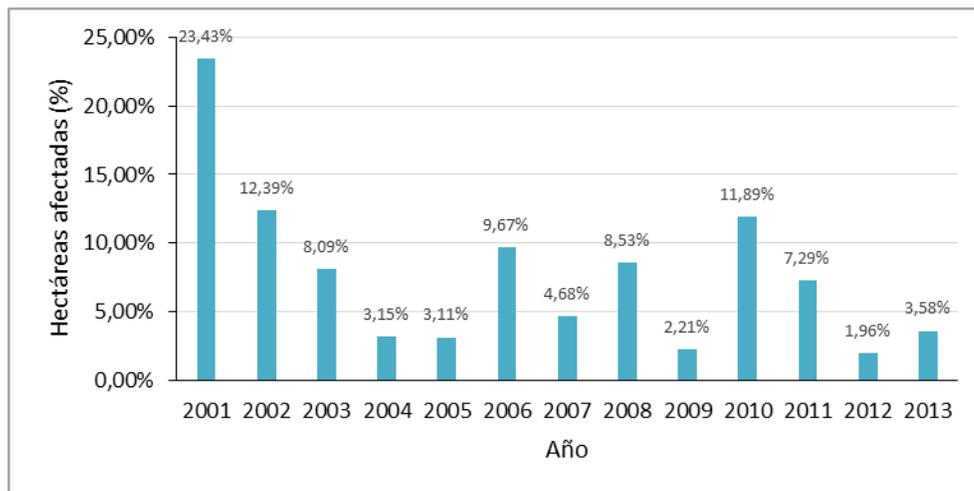
Figura 15. **Porcentaje de bosques de coníferas afectados por año, durante el período 2001-2013**



Fuente: elaboración propia, utilizando Excel 2013.

Sin embargo, si se observa la figura 16, en el 2001 se perdió el equivalente a 23,43 % de hectáreas de latifoliadas; luego, se encuentra el año 2002 con un porcentaje de 12,39 % y en seguida el año 2010 con el 11,89 %. Mientras tanto, el 2013 posee la menor cifra, la cual tan solo asciende al 1,96 %.

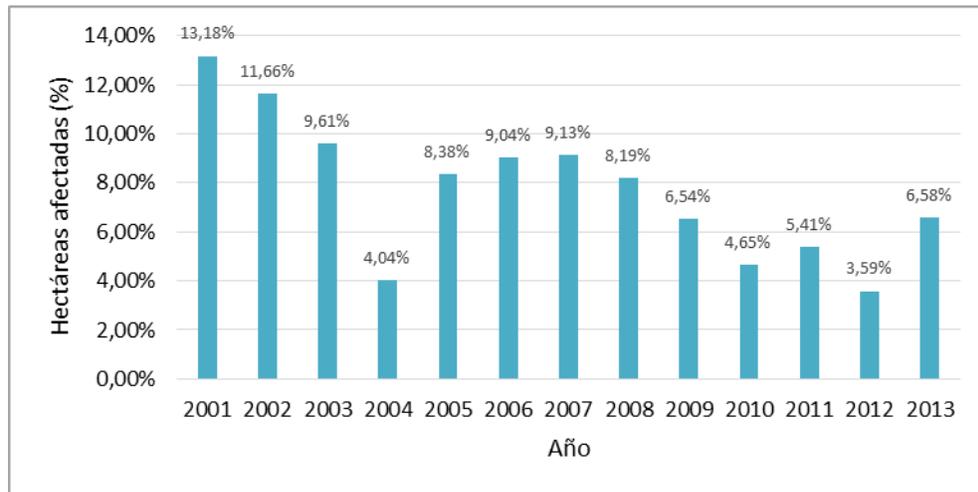
Figura 16. **Porcentaje de bosques de latifolias afectados por año, durante el período 2001-2013**



Fuente: elaboración propia, utilizando Excel 2013.

En cuanto a la superficie boscosa que no se encuentra en el grupo de áreas protegidas, se hace notorio en la figura 17, que fue mayormente dañada durante los primeros tres años observados: 2001 (13,18 %), 2002 (11,66 %) y 2003 (9,61 %). Así también, se puede determinar que el 2012 fue en el que se afectó menor extensión de esta superficie.

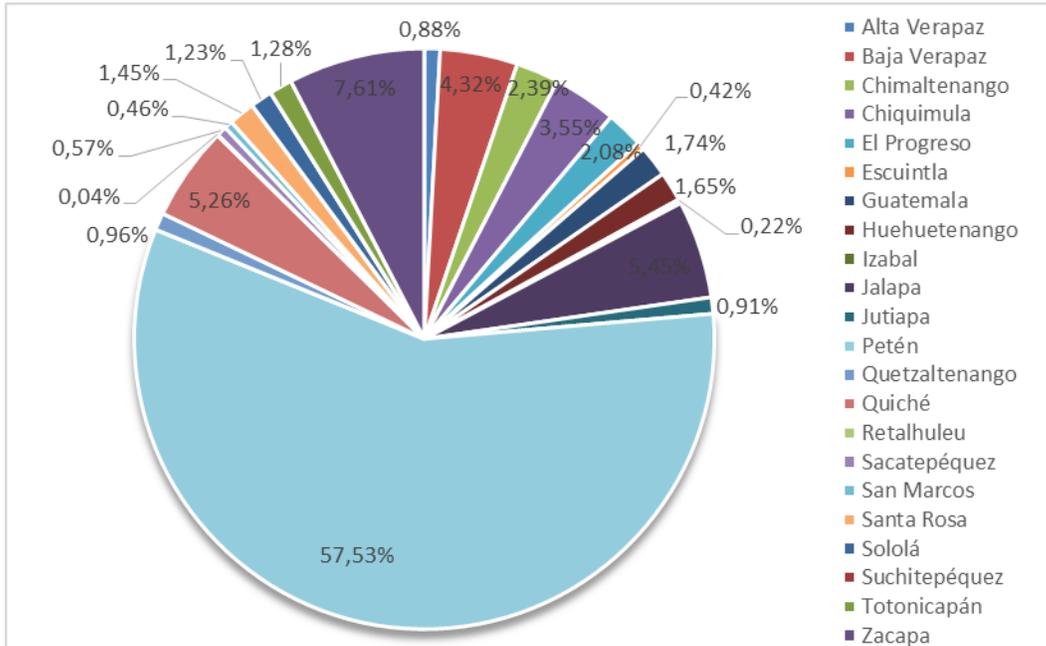
Figura 17. **Porcentaje de áreas forestales no protegidas afectadas por año, durante el período 2001-2013**



Fuente: elaboración propia, utilizando Excel 2013.

En la figura que a continuación se presenta, fácilmente se puede apreciar que los departamentos con más superficie dañada son Petén (57,53 %), Zacapa (7,61 %), Jalapa (5,45 %) y Quiché (5,26 %); indudablemente Petén es el departamento más afectado en cuanto a hectáreas de bosque perdidas, pero en cuanto a incidentes ocurridos durante los años presentados, solamente el 7,75 % de los incendios forestales se desarrollaron en dicho departamento.

Figura 18. **Cantidad de hectáreas afectadas por departamento, durante el período 2001-2013**



Fuente: elaboración propia, utilizando Excel 2013.

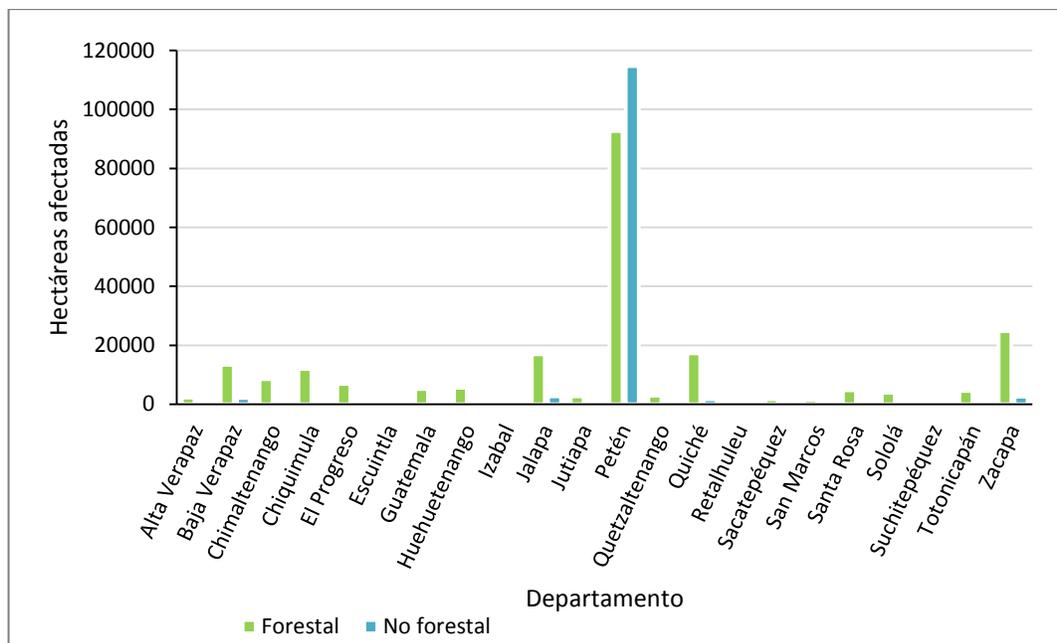
Por otro lado, la figura 19 establece la superficie que se dañificó por los incendios forestales, en cada uno de los departamentos del país, durante los años comprendidos entre el 2001 y 2013; fácilmente se aprecia que Petén es el departamento en el que se dañó la mayor cantidad de extensión, tanto forestal como no forestal, 44,70 % (92 716 ha) y 55,30 % (114 713 ha), respectivamente. A esto se añade, que el 87,00 % de la superficie no forestal perjudicada se concentra en dicho departamento.

También, a través de la gráfica se observa que Zacapa es el segundo departamento con mayor superficie deteriorada: el 90,58 % (24 850 ha)

pertenece al área forestal; por tanto el 9,42 % (2 585 ha) a superficie no forestal.

Si se examina detalladamente, existen departamentos en los que la cantidad de hectáreas afectadas es muy pequeña, en comparación con la de otros departamentos, claro está. Entre estos departamentos se encuentra Escuintla, Izabal, Retalhuleu y Suchitepéquez; en el caso de los dos últimos departamentos mencionados, la extensión que sufrió altercados, únicamente fue de tipo forestal, y asciende al 0,04 % (137 ha) y 0,003 % (11 ha), respectivamente.

Figura 19. **Cantidad y tipo de superficie afectada por departamento, durante el período 2001-2013**

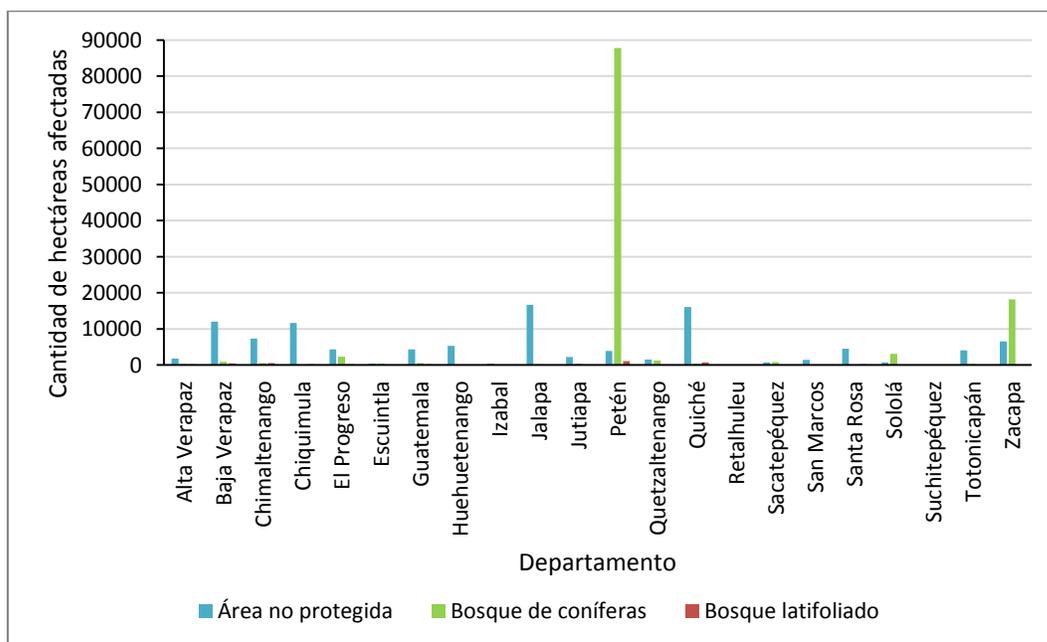


Fuente: elaboración propia, utilizando Excel 2013.

Seguidamente, se muestran diferentes gráficas que resumen la información de la superficie forestal afectada para cada departamento de la República de Guatemala.

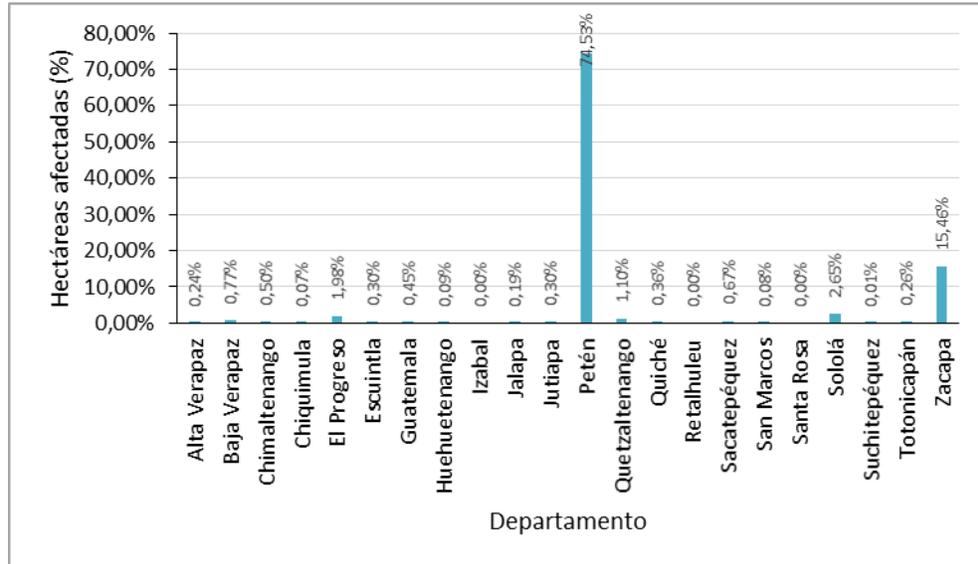
Por medio de la gráfica 20, resulta fácil establecer que en Petén la superficie forestal más damnificada fue el bosque de coníferas; se estima que dentro del departamento se deterioró un 94,68 % de este tipo de bosque; además, a partir de la figura 21, es notorio que en relación con los demás departamentos, el 74,53 % de la cobertura de coníferas que se afectó por los incendios forestales alrededor del país, se concentra en el mencionado departamento.

Figura 20. **Cantidad y tipo de superficie forestal afectada por departamento, durante el período 2001-2013**



Fuente: elaboración propia, utilizando Excel 2013.

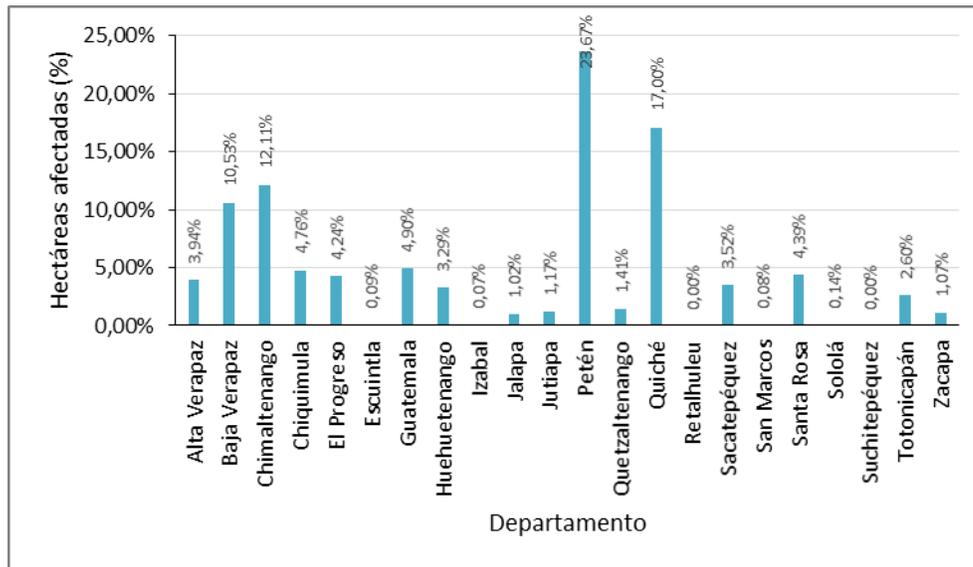
Figura 21. **Porcentaje de bosques de coníferas afectados por departamento, durante el período 2001-2013**



Fuente: elaboración propia, utilizando Excel 2013.

Con referencia a la figura 20, también se puede examinar que el bosque de latifolias fue el menos perjudicado en todos los departamentos. Pero, la siguiente gráfica muestra cómo se distribuye el 1,54 % de esta clase de hectáreas damnificadas en los diferentes departamentos. Así pues, se determina que Petén perdió alrededor de 23,67 %; es decir 1 050 hectáreas de cobertura de latifolias, siendo también el departamento en el cual se dañó mayor cobertura de este tipo de bosque. Por debajo se ubica Quiché con el 17,00 %, equivalente a 754 hectáreas.

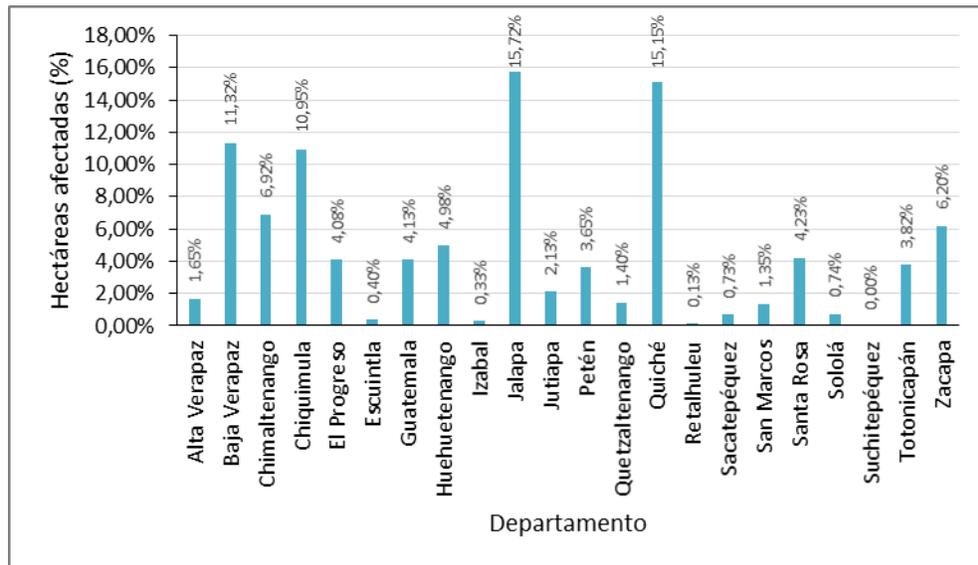
Figura 22. **Porcentaje de bosques de latifolias afectados por departamento, durante el período 2001-2013**



Fuente: elaboración propia, utilizando Excel 2013.

Asimismo, es posible apreciar en la figura 20 que las hectáreas de áreas no protegidas son las más afectadas en la mayoría de los departamentos, a excepción de Petén, Zacapa y Sololá. Los más perjudicados respecto de este tipo de cobertura forestal son Jalapa y Quiché, lo cual se observa más claramente en la figura 23; en la misma se establece que en estos últimos departamentos, entre el 2001 y 2013, se damnificó el 15,72 % y el 15,15 %, respectivamente, en comparación con el resto de departamentos.

Figura 23. **Porcentaje de áreas no protegidas afectadas por departamento, durante el período 2001-2013**

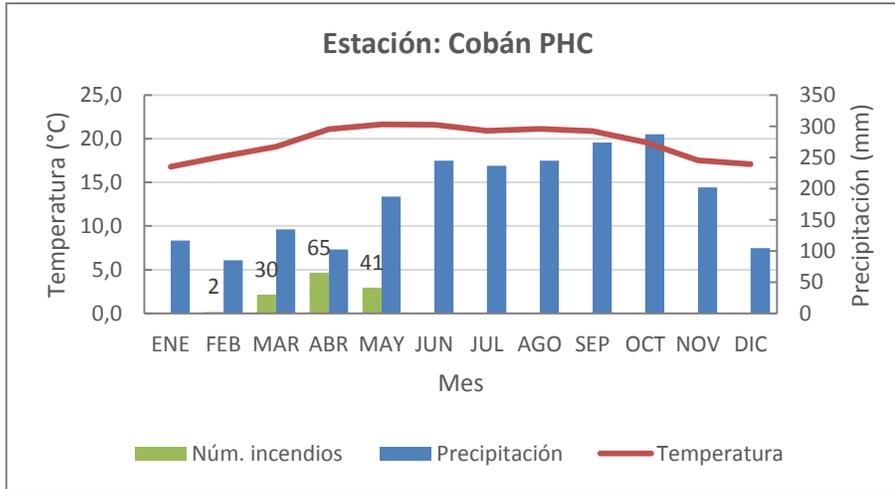


Fuente: elaboración propia, utilizando Excel 2013.

4.3. Caracterización de los incendios forestales por departamento

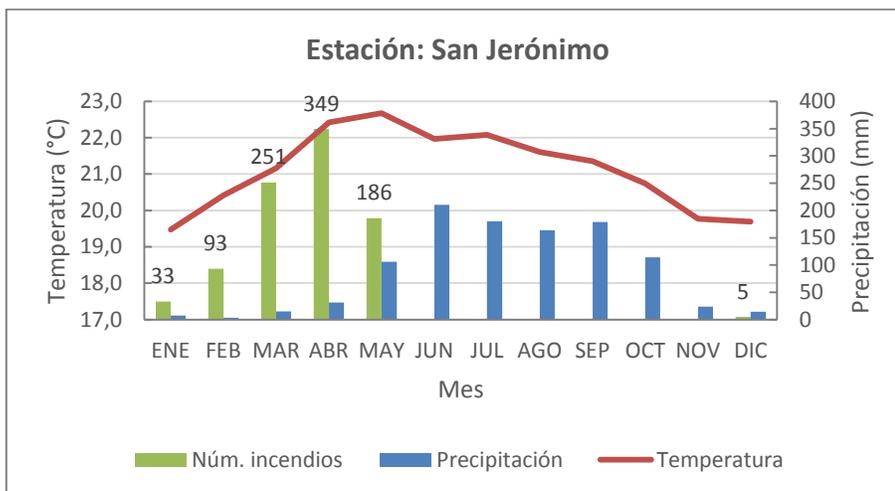
A través de los siguientes gráficos se presenta la cantidad de incendios forestales, que ocurrieron en el período comprendido entre el 2001 y 2013, clasificados conforme al mes en que estos sucedieron en cada uno de los departamentos del país. Además, se agregan al gráfico la precipitación y la temperatura media mensual de las estaciones meteorológicas existentes dentro de la jurisdicción de cada departamento.

Figura 24. **Histograma de cantidad de incendios forestales por mes y climadiagrama de Alta Verapaz. Período 2001-2013**



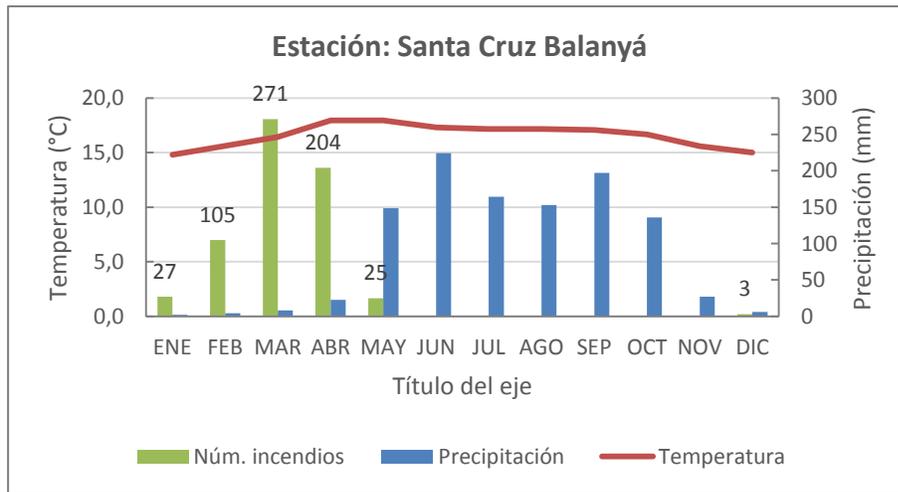
Fuente: elaboración propia, utilizando Excel 2013.

Figura 25. **Histograma de cantidad de incendios forestales por mes y climadiagrama de Baja Verapaz. Período 2001-2013**



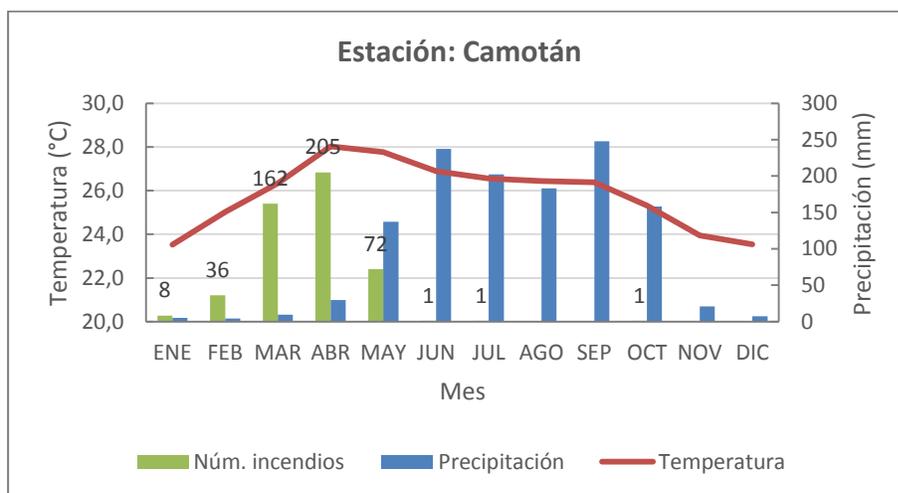
Fuente: elaboración propia, utilizando Excel 2013.

Figura 26. **Histograma de cantidad de incendios forestales por mes y climadiagrama de Chimaltenango. Período 2001-2013**



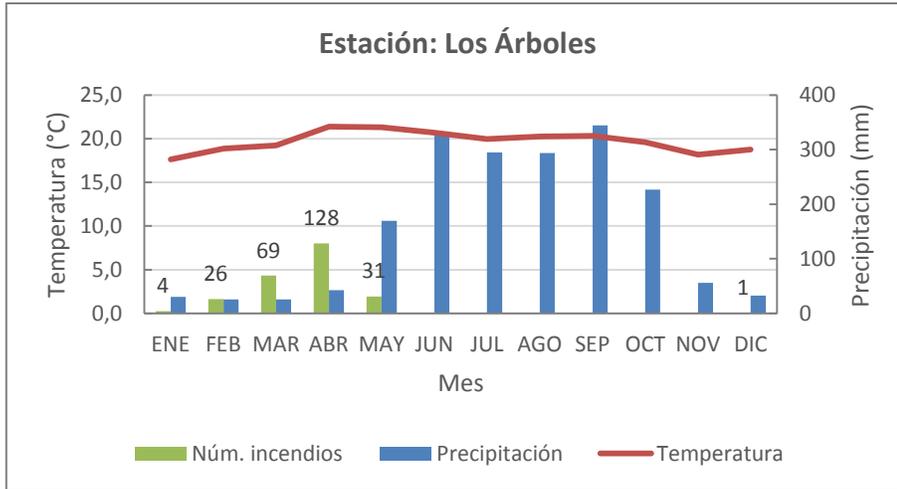
Fuente: elaboración propia, utilizando Excel 2013.

Figura 27. **Histograma de cantidad de incendios forestales por mes y climadiagrama de Chiquimula. Período 2001-2013**



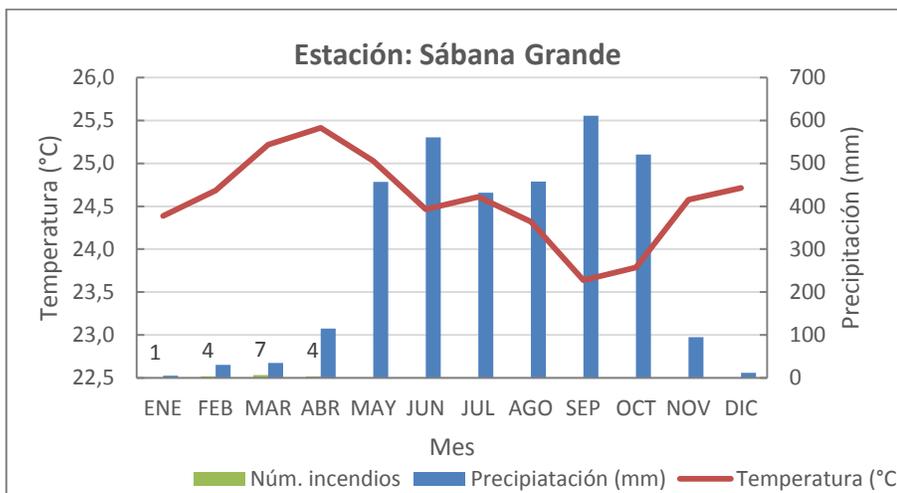
Fuente: elaboración propia, utilizando Excel 2013.

Figura 28. **Histograma de cantidad de incendios forestales por mes y climadiagrama de El Progreso. Período 2001-2013**



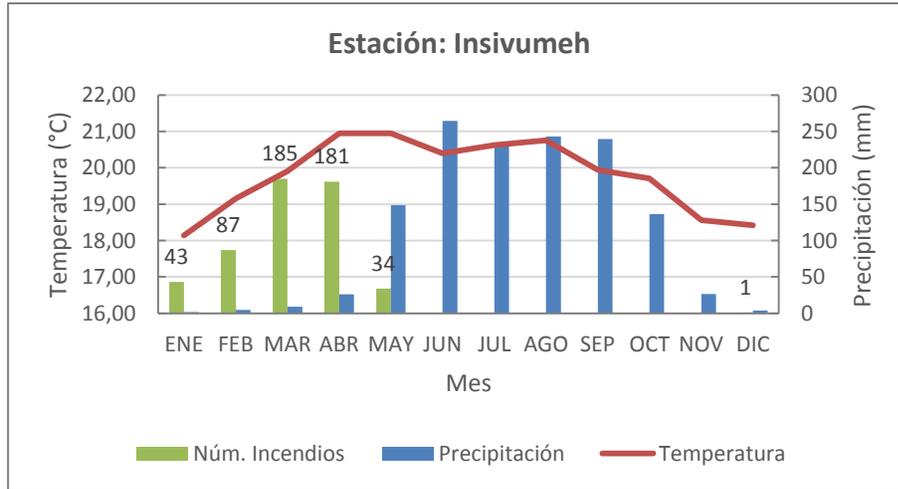
Fuente: elaboración propia, utilizando Excel 2013.

Figura 29. **Histograma de cantidad de incendios forestales por mes y climadiagrama de Escuintla. Período 2001-2013**



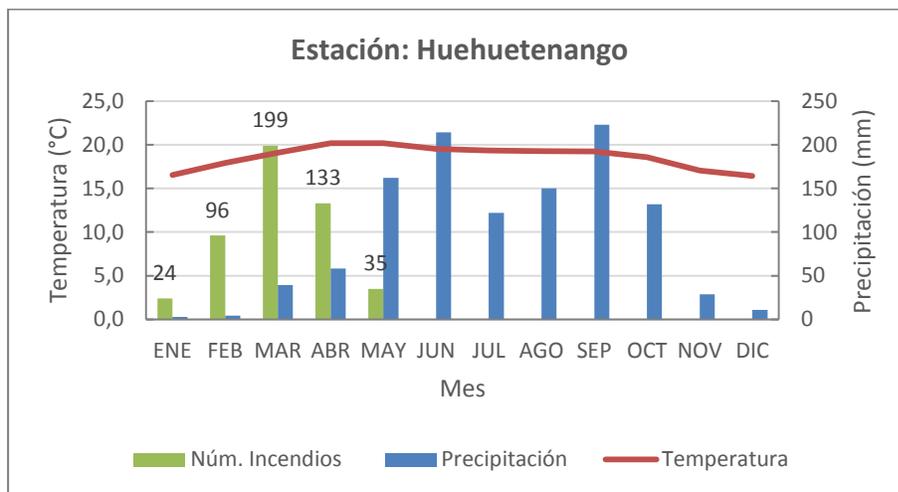
Fuente: elaboración propia, utilizando Excel 2013.

Figura 30. **Histograma de cantidad de incendios forestales por mes y climadiagrama de Guatemala. Período 2001-2013**



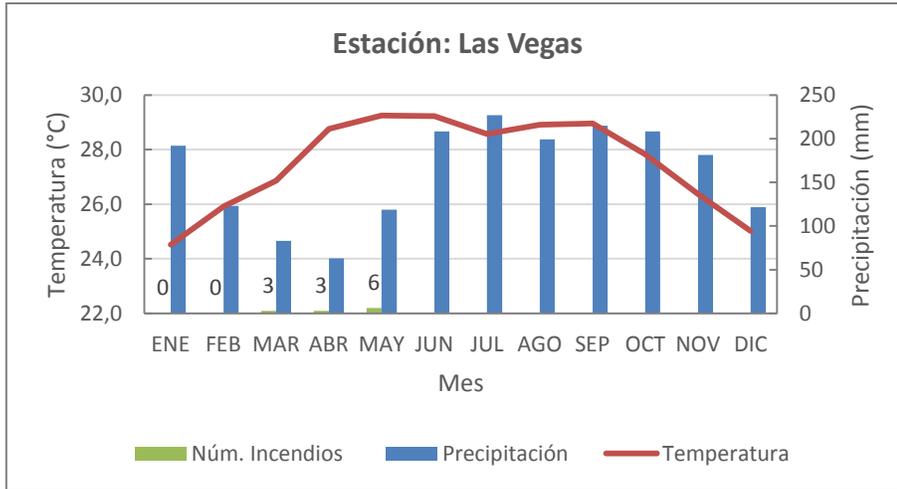
Fuente: elaboración propia, utilizando Excel 2013.

Figura 31. **Histograma de cantidad de incendios forestales por mes y climadiagrama de Huehuetenango. Período 2001-2013**



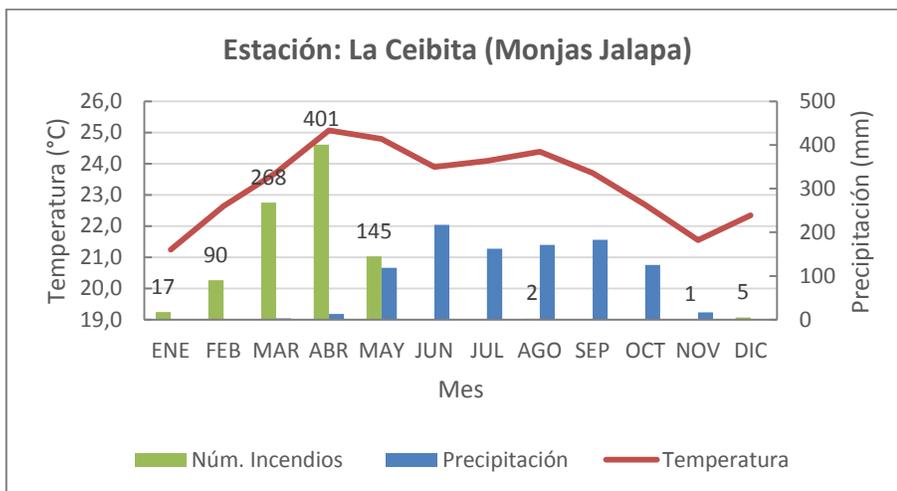
Fuente: elaboración propia, utilizando Excel 2013.

Figura 32. **Histograma de cantidad de incendios forestales por mes y climadiagrama de Izabal. Período 2001-2013**



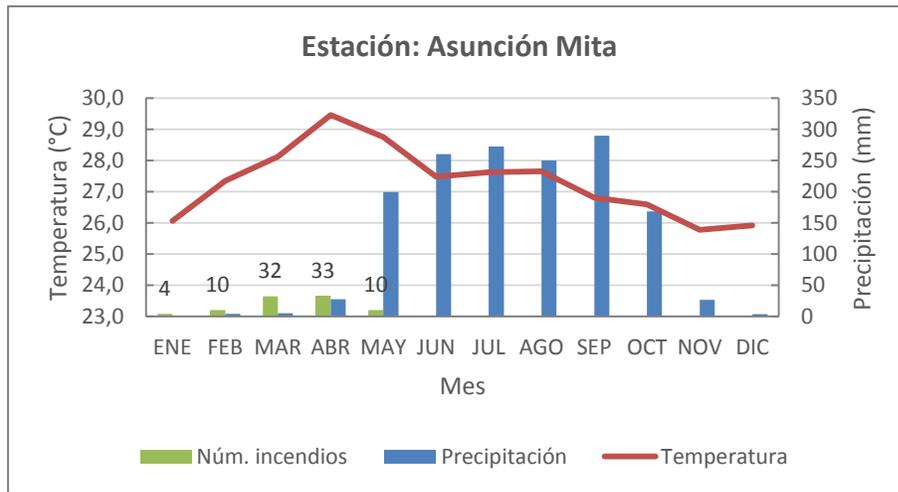
Fuente: elaboración propia, utilizando Excel 2013.

Figura 33. **Histograma de cantidad de incendios forestales por mes y climadiagrama de Jalapa. Período 2001-2013**



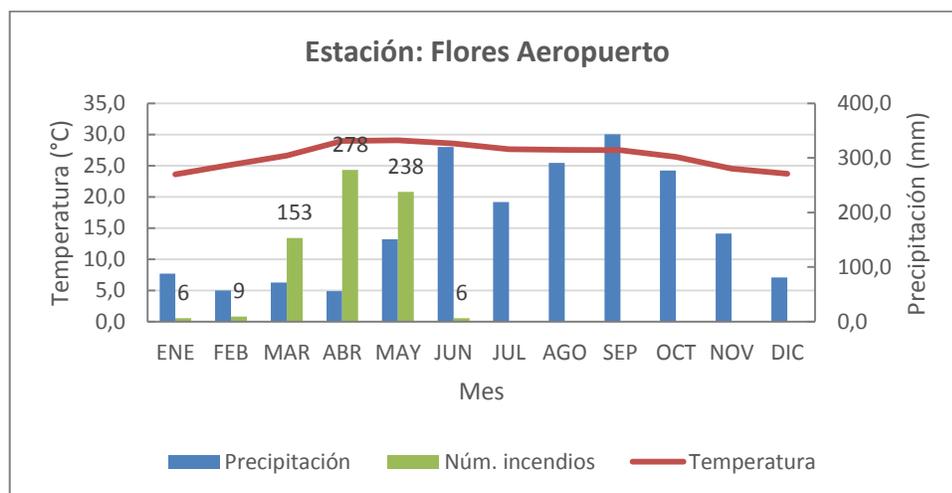
Fuente: elaboración propia, utilizando Excel 2013.

Figura 34. **Histograma de cantidad de incendios forestales por mes y climadiagrama de Jutiapa. Período 2001-2013**



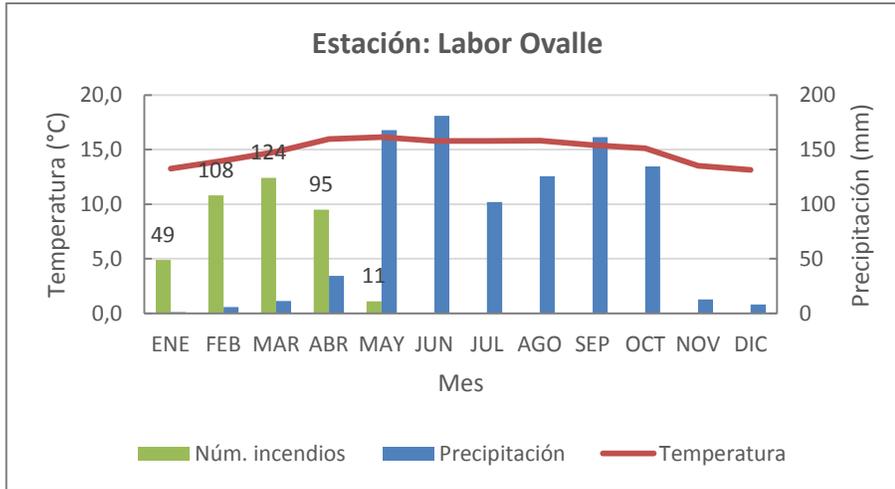
Fuente: elaboración propia, utilizando Excel 2013.

Figura 35. **Histograma de cantidad de incendios forestales por mes y climadiagrama de Petén. Período 2001-2013**



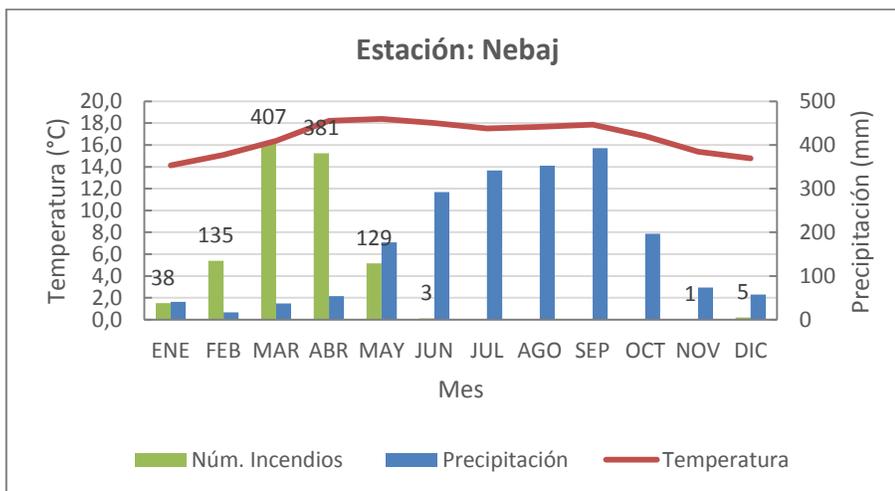
Fuente: elaboración propia, utilizando Excel 2013.

Figura 36. **Histograma de cantidad de incendios forestales por mes y climadiagrama de Quetzaltenango. Período 2001-2013**



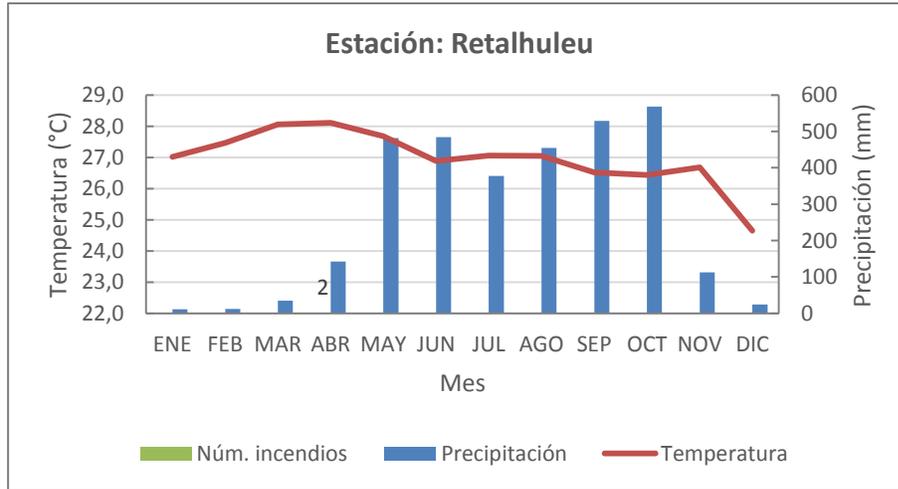
Fuente: elaboración propia, utilizando Excel 2013.

Figura 37. **Histograma de cantidad de incendios forestales por mes y climadiagrama de Quiché. Período 2001-2013**



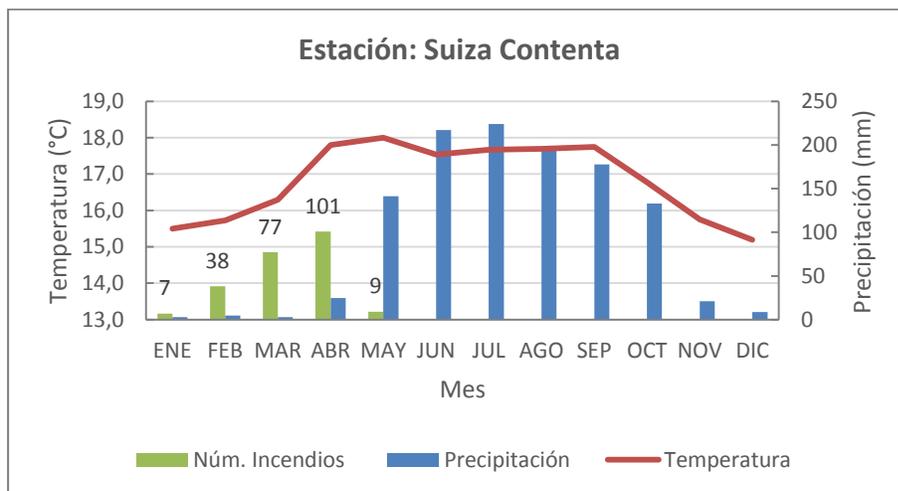
Fuente: elaboración propia, utilizando Excel 2013.

Figura 38. **Histograma de cantidad de incendios forestales por mes y climadiagrama de Retalhuleu. Período 2001-2013**



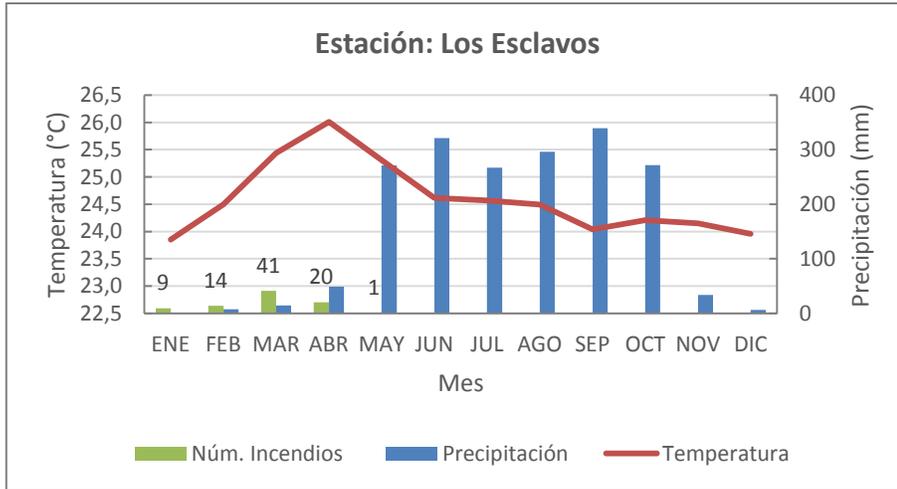
Fuente: elaboración propia, utilizando Excel 2013.

Figura 39. **Histograma de cantidad de incendios forestales por mes y climadiagrama de Sacatepéquez. Período 2001-2013**



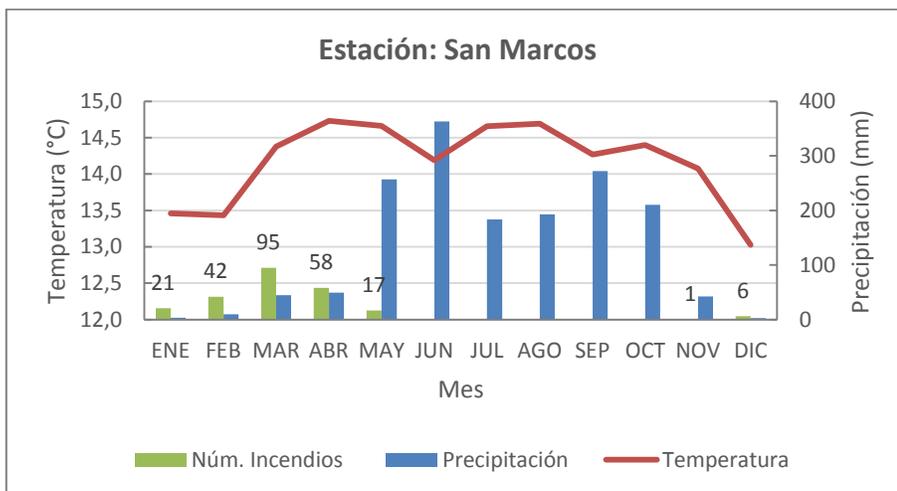
Fuente: elaboración propia, utilizando Excel 2013.

Figura 40. **Histograma de cantidad de incendios forestales por mes y climadiagrama de Santa Rosa. Período 2001-2013**



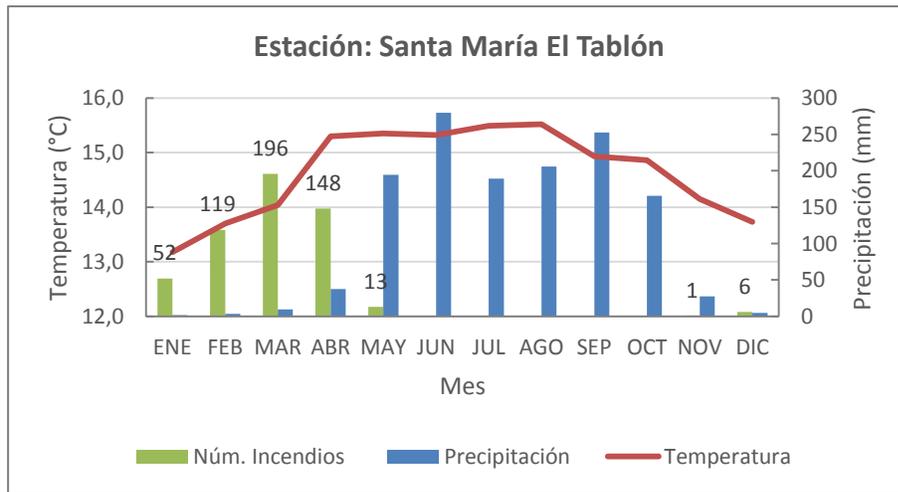
Fuente: elaboración propia, utilizando Excel 2013.

Figura 41. **Histograma de cantidad de incendios forestales por mes y climadiagrama de San Marcos. Período 2001-2013**



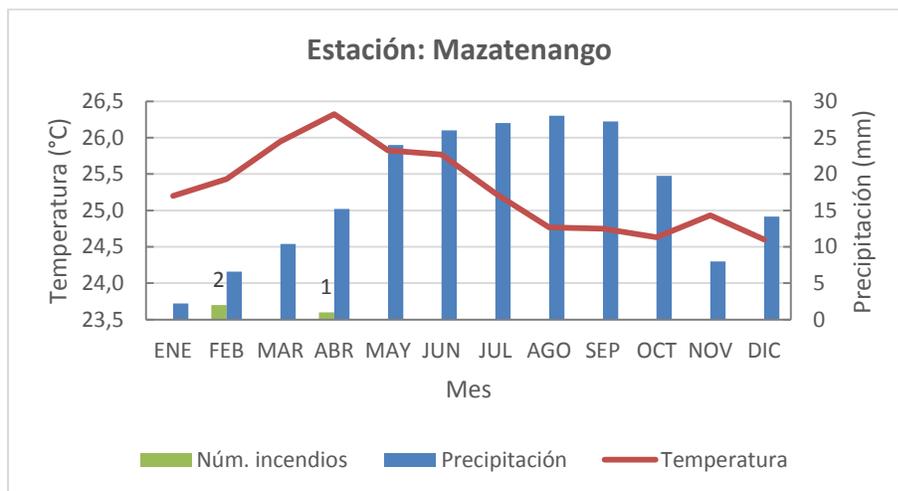
Fuente: elaboración propia, utilizando Excel 2013.

Figura 42. **Histograma de cantidad de incendios forestales por mes y climadiagrama de Sololá. Período 2001-2013**



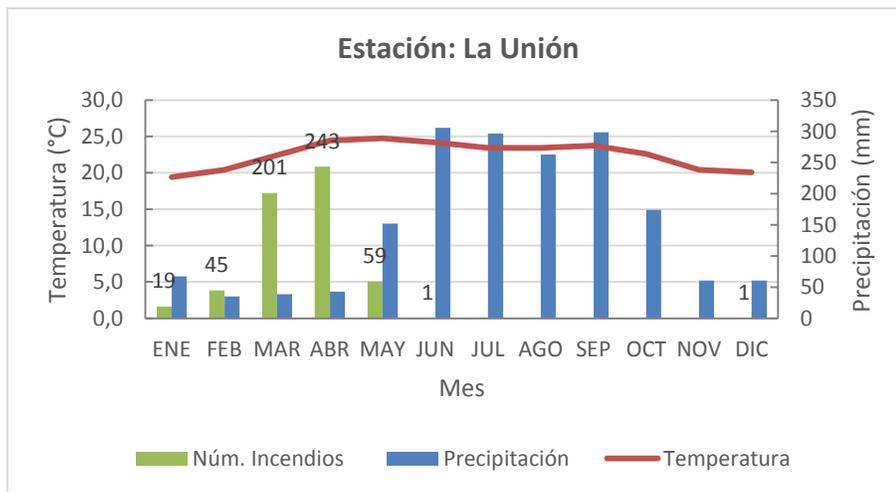
Fuente: elaboración propia, utilizando Excel 2013.

Figura 43. **Histograma de cantidad de incendios forestales por mes y climadiagrama de Suchitepéquez. Período 2001-2013**



Fuente: elaboración propia, utilizando Excel 2013.

Figura 44. **Histograma de cantidad de incendios forestales por mes y climadiagrama de Zacapa. Período 2001-2013**

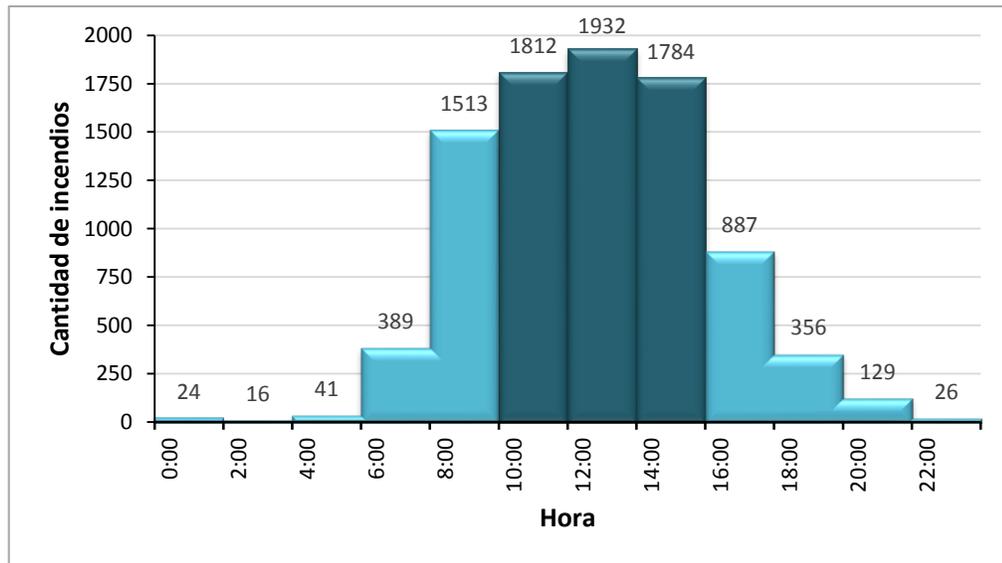


Fuente: elaboración propia, utilizando Excel 2013.

4.4. Horario recurrente de desarrollo de incendios forestales

La figura 45 presenta la cantidad de incendios forestales por hora que ocurrieron dentro de todo el territorio nacional durante el periodo 2001-2013. A través del histograma se puede observar que la mayor cantidad de incendios forestales se suscitaron entre las 12:00 y las 14:00 horas; dentro de dicho horario se originaron 1 932 incendios forestales; seguidamente, se puede apreciar que de las 10:00 a las 12:00 horas se generaron 1 812 siniestros y muy cercano, con tan solo 25 incendios de diferencia, se encuentra el horario de las 14:00 a las 16:00 horas, al que le corresponden 1 787 eventos de este tipo.

Figura 45. **Histograma de cantidad de incendios forestales por hora, durante el período 2001-2013**

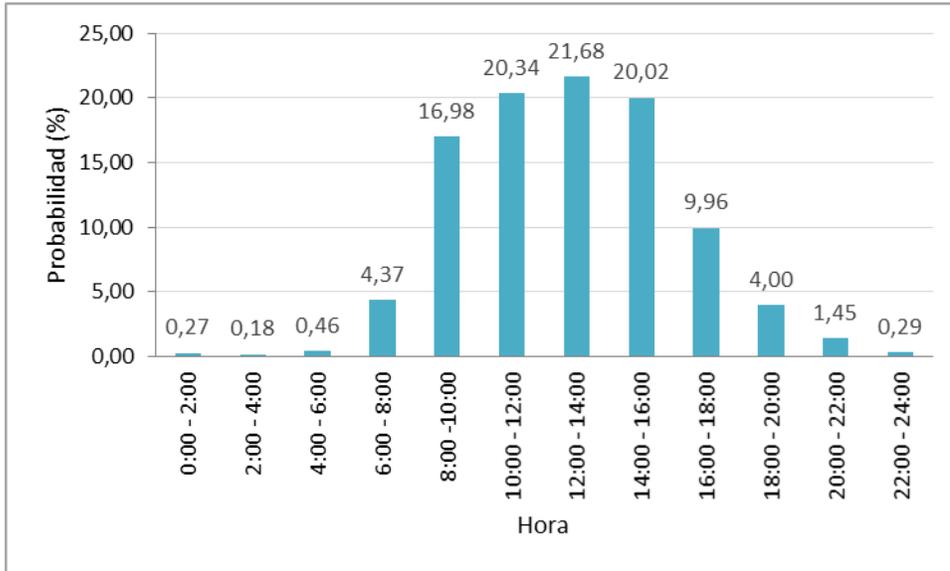


Fuente: elaboración propia, utilizando Excel 2013.

Al mismo tiempo, la figura anterior hace evidente que existe una diferencia significativa entre los horarios comprendidos de las 10:00 a las 16:00 horas y el resto.

La diferencia mencionada se puede determinar mediante la figura 46, que muestra la probabilidad empírica de ocurrencia de un evento (incendio forestal) según la hora del día; por consiguiente, se estima que en el horario de las 12:00 a las 14:00 horas existe la probabilidad del 21,68 % de ocurrencia de un incendio forestal; en el de las 10:00 a las 12:00 horas el 20,34 % y para el de las 14:00 a 16:00 horas el 20,02 %. Por tanto, para el desarrollo del modelo numérico de predicción de zonas potenciales de desarrollo de incendios forestales, se utilizaron los eventos que ocurrieron dentro de estos horarios.

Figura 46. **Probabilidad empírica de ocurrencia de los incendios forestales por hora**

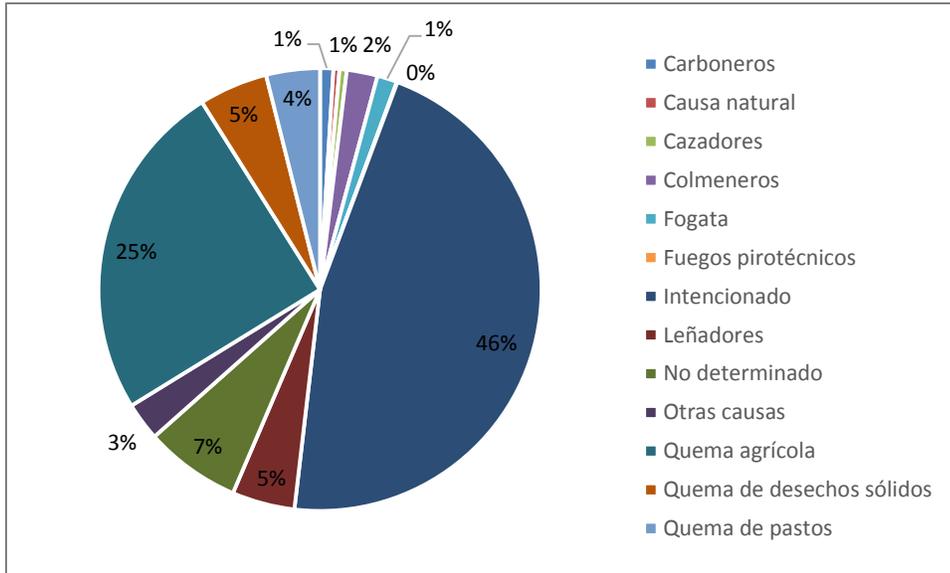


Fuente: elaboración propia, utilizando Excel 2013.

4.5. **Causas de la generación de los incendios forestales presentados durante el período 2001-2013**

A continuación se muestra la figura 47, que contiene la información de las principales causas de los incendios suscitados entre el 2001 y 2013, en el horario de las 10:00 a las 16:00 horas. Claramente, la principal causa de la generación de incendios forestales es intencionada (46,00 %), seguido de la quema agrícola (25,00 %); por causas naturales apenas se inició el 0,44 % de estos eventos.

Figura 47. Principales causas que dan origen a los incendios forestales



Fuente: elaboración propia, utilizando Excel 2013.

4.6. Regionalización de las variables meteorológicas que influyen en el desarrollo de los incendios forestales

Aplicando la teoría de conjuntos con las variables de temperatura ambiental de las 13:00 horas, humedad relativa de las 13:00 horas e incendios forestales, se establecieron cuatro regiones, en las que se desarrollan incendios forestales con distintos parámetros de humedad. Las regiones establecidas en función de las condiciones meteorológicas son:

- La región 1 engloba a los departamentos de Baja Verapaz, Chiquimula, El Progreso, Jutiapa, Zacapa y parte de Jalapa.
- La región 2 la conforman los departamentos de Alta Verapaz, Izabal y Petén.

- La región 3 se encuentra integrada por los siguientes departamentos: Chimaltenango, Guatemala, Huehuetenango, Quetzaltenango, Quiché, Sacatepéquez, San Marcos, Sololá, Totonicapán y parte de Jalapa.
- La región 4 la componen los departamentos de Escuintla, Retalhuleu, Santa Rosa y Suchitepéquez.

Tabla IX. **Condiciones meteorológicas que muestran mayor probabilidad de iniciación del fuego, según región**

Variables meteorológicas	Región 1	Región 2	Región 3	Región 4
T _{seco} (13:00 hrs) (°C)	25,0-39,0	25,0-39,0	20,0-30,0	29,0-34,0
T _{max} (°C)	26,0-40,0	25,0-30,0 35,0-40,0	20,0-35,0	30,0-35,0
H _{13:00 hrs} (%)	30-90	30-70	10-50	60-90
H _{max} (%)	70-100	90-100	70-100	90-100
Tensión de vapor _{13:00 hrs} (mmHg)	10,0-30,0	10,0-25,0	5,0-25,0	25,0-30,0
T _{rocio} (13:00 hrs) (°C)	15,0-30,0	15,0-25,0	2,0-20,0	25,0-30,0
Precipitación (mm)	0,00	0,00	0,00	0,00
Nubosidad (octas)	0-3	0-4	0-2	2-7
Velocidad del viento (Km/h)	0,0-10,0	0,0-15,0	0,0-20,0	4-8
Insolación (hrs)	6,0-10,0	7,0-11,0	8,0-11,0	nd
Radiación media (Cal/cm ² /min)	0,20-0,30	nd	0,35-0,65	nd
Radiación máxima (Cal/cm ² /min)	1,00-1,10	nd	1,20-1,85	nd
Presión atmosférica _{13:00 hrs} (mmHg)	nd	746,7-871,4	573.7-1008,3	nd

Fuente: elaboración propia.

4.7. Modelos numéricos para la predicción de zonas potenciales para el desarrollo de incendios forestales

Se ajustaron los parámetros del modelo numérico de predicción de zonas potenciales para el desarrollo de incendios forestales, basado en el índice de Chandler, en la caracterización de los incendios forestales y en las condiciones meteorológicas de la base de datos registrados del 2001 al 2013. Además, se utilizaron las 4 regiones obtenidas anteriormente; por tanto, se obtuvieron cuatro modelos, uno por cada región establecida.

A través de un análisis de sensibilidad de los parámetros del modelo se logró detectar que el parámetro de sensibilidad es la humedad relativa, en consecuencia, los factores que acompañan a la misma dentro de la ecuación original fueron los que se ajustaron para obtener los mejores resultados.

4.7.1. Modelo numérico establecido para la región 1

En la tabla X se pueden apreciar los rangos de temperatura ambiente y humedad relativa a las 13:00 horas, seleccionados para elaborar el modelo numérico para pronosticar zonas en las que se puede desarrollar un incendio forestal en la región 1.

Tabla X. **Rangos de temperatura ambiente y humedad relativa a las 13:00 horas en la región 1**

Temperatura ambiente (°C)	Humedad relativa (%)	Cantidad de incendios forestales (%)
25-30	50-60	5,36
25-30	60-90	28,21
30-35	30-59	27,14

Continuación de la tabla X.

30-35	60-90	30,71
35-40	30-60	8,57

Fuente: elaboración propia.

4.7.1.1. Ecuación para la predicción de incendios forestales en la región 1

$$IC = \frac{((110 - 1,056H) - (10,20 - T)) * (124 * 10^{-0,005H})}{40}$$

Donde:

IC = índice de Chandler

H = humedad relativa a las 13:00 horas (%)

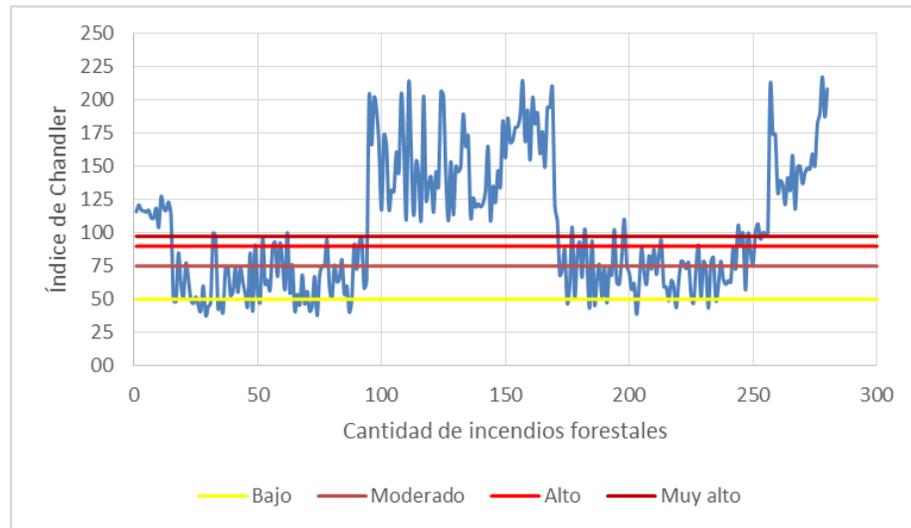
T = temperatura ambiental a las 13:00 horas (°C)

Tabla XI. Comparación de los parámetros de ajuste entre la ecuación del índice de Chandler original y la ecuación de la región 1

Parámetro	Ecuación original	Ecuación región 1	Correlación entre los parámetros		
			A	B	C
A	1,3730	1,056	1,000	0,962	0,861
B	-0,0142	-0,005	0,962	1,000	0,963
C	60,0000	40,000	0,861	0,963	1,000

Fuente: elaboración propia.

Figura 48. **Resultados del grado de peligro de incendios forestales en la región 1**



Fuente: elaboración propia, utilizando Excel 2013.

Tabla XII. **Grado de peligro de incendios forestales en la región 1**

Grado de peligro	Cantidad de incendios forestales (%)	Temperatura máxima (°C)	Humedad relativa (%)
Nulo	11,43	25-30	80-90
Bajo	26,07	25-35	70-85
Moderado	10,71	25-35	65-75
Alto	5,36	25-35	60-85
Muy alto	46,43	25-40	30-65

Fuente: elaboración propia.

Con el modelo matemático anterior se obtuvieron los valores con los que se determinó el grado de peligro de incendio forestal en la región 1; estos se encuentran trazados en la figura 48. Mediante dicha figura y la tabla XII, se

observa que el 62,50 % de los datos, según el índice creado para la región, presenta valores que indican un grado de peligro de moderado a muy alto, para la ocurrencia de incendio forestal.

4.7.2. Modelo numérico establecido para la región 2

A partir de la tabla siguiente es posible observar los rangos de temperatura ambiente y humedad relativa que fueron utilizados para crear el modelo numérico para la predicción de un incendio forestal en la región 2.

Tabla XIII. **Rangos de temperatura ambiente y humedad relativa a las 13:00 horas en la región 2**

Temperatura ambiente (°C)	Humedad relativa (%)	Cantidad de incendios forestales (%)
25-30	40-70	32,35
30-35	35-60	38,24
35-40	30-50	29,41

Fuente: elaboración propia.

4.7.2.1. Ecuación para la predicción de incendios forestales en la región 2

$$IC = \frac{((110 - 1,058H) - (10,20 - T)) * (124 * 10^{-0,008H})}{40}$$

Donde:

IC = índice de Chandler

H = humedad relativa a las 13:00 horas (%)

T = temperatura ambiental a las 13:00 horas (°C)

Tabla XIV. **Comparación de los parámetros de ajuste entre la ecuación del índice de Chandler original y la ecuación de la región 2**

Parámetro	Ecuación original	Ecuación región 2	Correlación entre los parámetros		
			A	B	C
A	1,3730	1,058	1,000	0,978	0,908
B	-0,0142	-0,008	0,978	1,000	0,975
C	60,0000	40,000	0,908	0,975	1,000

Fuente: elaboración propia.

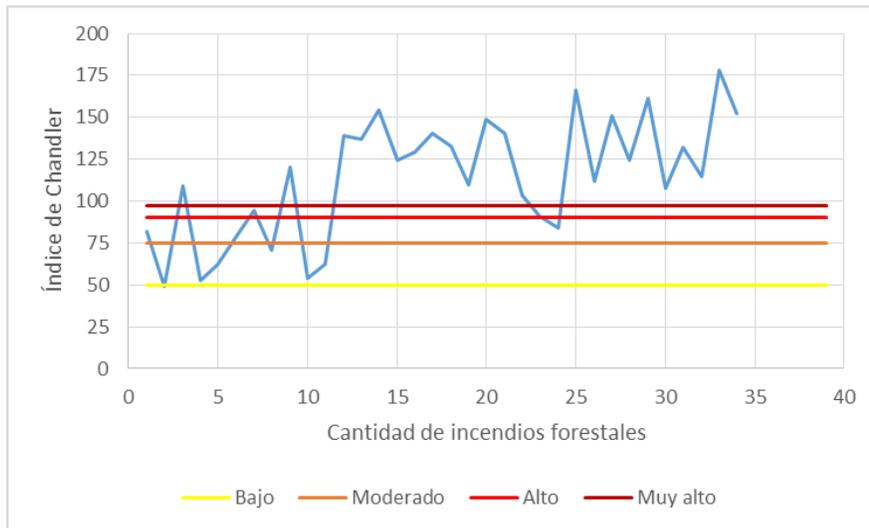
Con el modelo matemático anterior se obtuvieron los valores con los que se puede establecer el grado de peligro de incendio forestal en la región 2. En la gráfica siguiente (figura 49) se trazaron los valores alcanzados a través de la ecuación anterior y conjuntamente con la tabla XV, hacen notorio que el 82,35 % de los datos son valores que presentan un grado de peligro de moderado a muy alto, para la ocurrencia de incendio forestal.

Tabla XV. **Grado de peligro de incendios forestales en la región 2**

Grado de peligro	Cantidad de incendios forestales (%)	Temperatura máxima (°C)	Humedad relativa (%)
Nulo	2,94	25-30	60-70
Bajo	14,71	25-30	60-65
Moderado	8,82	25-35	50-55
Alto	5,88	25-35	50-55
Muy alto	67,65	25-40	30-50

Fuente: elaboración propia.

Figura 49. **Resultados del grado de peligro de incendios forestales en la región 2**



Fuente: elaboración propia, utilizando Excel 2013.

4.7.3. Modelo numérico establecido para la región 3

Para establecer el modelo numérico, basado en el índice de Chandler, para la región 3, se crearon los rangos de temperatura ambiente y humedad relativa mostrados en la tabla XIV.

Tabla XVI. **Rangos de temperatura ambiente y humedad relativa a las 13:00 horas en la región 3**

Temperatura ambiente (°C)	Humedad relativa (%)	Cantidad de incendios forestales (%)
20-25	20-50	58,39
25-30	10-40	41,61

Fuente: elaboración propia.

4.7.3.1. Ecuación para la predicción de incendios forestales en la región 3

$$IC = \frac{((110 - 1,302H) - (10,20 - T)) * (124 * 10^{-0,011H})}{35}$$

Donde:

IC = índice de Chandler

H = humedad relativa a las 13:00 horas (%)

T = temperatura ambiental a las 13:00 horas (°C)

Esta ecuación es el resultado del índice de Chandler para la región 3. Con base en este modelo matemático se pueden develar zonas en la que se pueda iniciar un incendio forestal en dicha región.

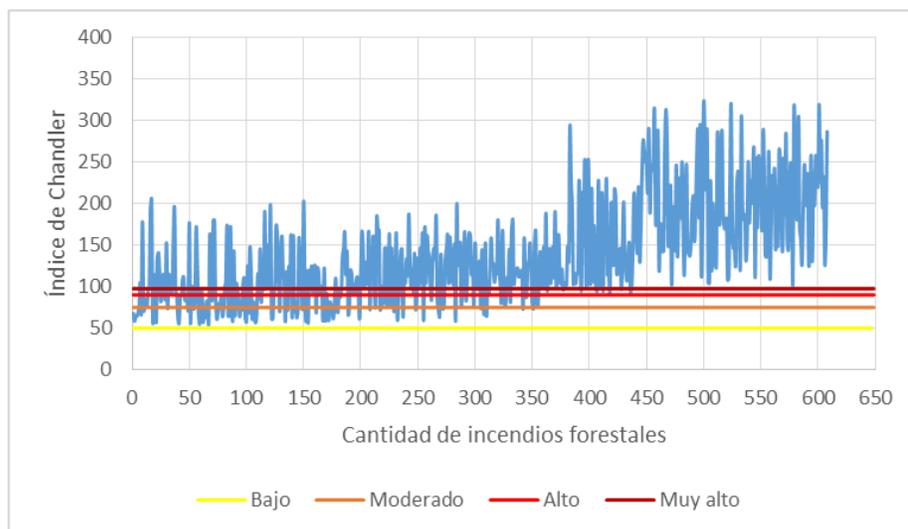
Tabla XVII. **Comparación de los parámetros de ajuste entre la ecuación del índice de Chandler original y la ecuación de la región 3**

Parámetro	Ecuación original	Ecuación región 3	Correlación entre los parámetros		
			A	B	C
A	1,3730	1,302	1,000	0,983	0,831
B	-0,0142	-0,011	0,983	1,000	0,913
C	60,0000	35,000	0,831	0,913	1,000

Fuente: elaboración propia.

En la figura 50 se presentan los diferentes valores obtenidos a partir de la ecuación determinada para la región 3; por consiguiente, resulta fácil establecer que todos los datos se encuentran como mínimo en un grado de peligro bajo.

Figura 50. **Resultados del grado de peligro de incendios forestales en la región 3**



Fuente: elaboración propia, utilizando Excel 2013.

Seguidamente se muestra la tabla XVIII, la cual expone la cantidad de incidentes y los rangos de temperatura ambiente y humedad relativa a las 13:00 horas, según el grado de peligro de incendio forestal determinado con base en el índice de Chandler establecido para la región 3.

Tabla XVIII. **Grado de peligro de incendios forestales en la región 3**

Grado de peligro	Cantidad de incendios forestales (%)	Temperatura máxima (°C)	Humedad relativa (%)
Nulo	0,00	--	--
Bajo	13,16	20-25	40-50
Moderado	9,54	20-25	40-45
Alto	4,93	20-30	35-40
Muy alto	72,37	20-30	10-40

Fuente: elaboración propia.

4.7.4. Modelo numérico establecido para la región 4

La cantidad de datos completos de incendios forestales para dicha área es muy limitada, a pesar de ello se generó un modelo basado en el índice de peligro de Chandler, para lo cual se establecieron los rangos de temperatura y humedad a los que se dieron los incendios.

Tabla XIX. **Rangos de temperatura ambiente y humedad relativa a las 13:00 horas en la región 4**

Temperatura ambiente (°C)	Humedad relativa (%)	Cantidad de incendios forestales (%)
29-34	60-90	100,00

Fuente: elaboración propia.

4.7.4.1. Ecuación para la predicción de incendios forestales en la región 4

$$IC = \frac{((110 - 1,067H) - (10,20 - T)) * (124 * 10^{-0,005H})}{35}$$

Donde:

IC = índice de Chandler

H = humedad relativa a las 13:00 horas (%)

T = temperatura ambiental a las 13:00 horas (°C)

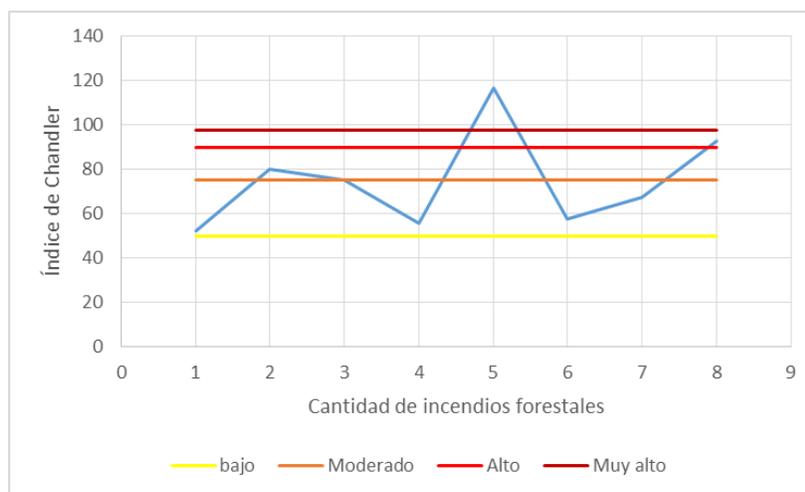
Tabla XX. **Comparación de los parámetros de ajuste entre la ecuación del índice de Chandler original y la ecuación de la región 4**

Parámetro	Ecuación original	Ecuación región 4	Correlación entre los parámetros		
			A	B	C
A	1,3730	1,067	1,000	0,989	0,969
B	-0,0142	-0,005	0,989	1,000	0,995
C	60,0000	35,000	0,969	0,995	1,000

Fuente: elaboración propia.

El modelo matemático establecido anteriormente es una modificación del índice de Chandler, el cual indica el grado de peligro de intensificación de incendio forestal para la región 4. Los valores de peligrosidad arrojados por el mismo se pueden observar mediante la figura siguiente:

Figura 51. **Resultados del grado de peligro de incendios forestales en la región 4**



Fuente: elaboración propia, utilizando Excel 2013.

Además la cantidad de incendios y los rangos de temperatura ambiente y humedad relativa a las 13:00 horas, según el grado de peligro de incendio forestal determinado con la ecuación establecida para la región 4, se puede apreciar en la tabla que a continuación se muestra.

Tabla XXI. **Grado de peligro de incendios forestales en la región 4**

Grado de peligro	Cantidad de incendios forestales (%)	Temperatura máxima (°C)	Humedad relativa (%)
Nulo	0,00	--	--
Bajo	50,00	29-34	75-85
Moderado	25,00	29-35	70-80
Alto	12,50	32-35	70-75
Muy alto	12,50	32-35	60-70

Fuente: elaboración propia.

4.8. Validación de los modelos numéricos

A continuación se muestran las tablas que resumen la validación de los modelos numéricos formulados para cada una de las cuatro regiones establecidas, indicando el grado de peligro y la cantidad de datos que le corresponde a cada mes examinado del año 2014, expresado en porcentaje. Para esto, se analizó una estación meteorológica representativa de cada región.

Tabla XXII. **Grado de peligro de ocurrencia de incendios forestales, según datos de validación del modelo numérico de la región 1**

Grado de peligro	Enero	Abril	Septiembre
Nulo	--	--	13,33 %
Bajo	--	--	26,67 %

Continuación de la tabla XXII.

Moderado	8,33 %	--	23,33 %
Alto	--	--	6,67 %
Muy alto	91,67 %	100,0 %	30,00 %

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIII. **Grado de peligro de ocurrencia de incendios forestales, según datos de validación del modelo numérico de la región 2**

Grado de peligro	Enero	Abril	Septiembre
Nulo	64,52 %	3,33 %	50,00 %
Bajo	22,58 %	3,33 %	40,00 %
Moderado	9,68 %	3,33 %	3,33 %
Alto	--	10,00 %	6,67 %
Muy alto	3,23 %	80,00 %	--

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIV. **Grado de peligro de ocurrencia de incendios forestales, según datos de validación del modelo numérico de la región 3**

Grado de peligro	Enero	Abril	Septiembre
Nulo	12,90 %	--	50,00 %
Bajo	19,35 %	3,33 %	36,67 %
Moderado	16,13 %	3,33 %	10,00 %

Continuación de la tabla XXIV

Alto	12,90 %	6,67 %	3,33 %
Muy alto	38,71 %	86,67 %	--

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXV. **Grado de peligro de ocurrencia de incendios forestales, según datos de validación del modelo numérico de la región 4**

Grado de peligro	Enero	Abril	Septiembre
Nulo	--	--	20,00 %
Bajo	--	--	40,00 %
Moderado	--	--	20,00 %
Alto	--	--	6,67 %
Muy alto	100,00 %	100,00 %	13,33 %

Fuente: elaboración propia.

Ahora bien, las siguientes tablas que se presentan, exponen el porcentaje de aciertos de ocurrencia de incendios forestales que se desarrollaron durante el 2015. Este porcentaje se obtuvo mediante el número de días en que se reportaron incendios forestales y el número de días que el modelo indicó un grado de peligro entre “moderado y “muy alto” de ocurrencia de incendios.

Tabla XXVI. **Porcentaje de aciertos de los incendios forestales ocurridos durante el 2015 para la región 1**

Mes	Núm. de días con incendios	Núm. de días con alerta	Porcentaje de aciertos
Enero	7	15	46,67

Continuación de la tabla XXVI.

Abril	28	30	93,33
Septiembre	0	9	0,00

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVII. **Porcentaje de aciertos de los incendios forestales ocurridos durante el 2015 para la región 2**

Mes	Núm. de días con incendios	Núm. de días con alerta	Porcentaje de aciertos
Enero	2	3	66,67
Abril	15	24	62,50
Septiembre	0	4	0,00

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVIII. **Porcentaje de aciertos de los incendios forestales ocurridos durante el 2015 para la región 3**

Mes	Núm. de días con incendios	Núm. de días de alerta	Porcentaje de aciertos
Enero	9	20	45,00
Abril	28	29	96,55
Septiembre	0	4	0,00

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIX. **Porcentaje de aciertos de los incendios forestales ocurridos durante el 2015 para la región 4**

Mes	Núm. de días con incendios	Núm. de días de alerta	Porcentaje de aciertos
Enero	1	30	3,33
Abril	2	30	6,67
Septiembre	0	20	0,00

Fuente: elaboración propia.

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Mediante la categorización por año de los incendios forestales que se generaron dentro del territorio guatemalteco se determinó que el 2002 presentó el mayor número de incidentes de este tipo. Esto se encuentra relacionado con el fenómeno de El Niño, el que se presentó con intensidad moderada durante dicho año, implicando una disminución importante en el régimen de lluvia y prolongación de la época de estiaje, propiciando así las condiciones en las que fácilmente se generan los incendios. Las mismas circunstancias se dieron en el 2007, lo que provocó que este año se situara en el cuarto lugar, en cuanto a incendios forestales ocurridos.

Respecto de la clasificación por departamentos presentada, no resulta extraño observar que en Petén los incendios forestales dañificaron la mayor parte de la cobertura boscosa del país, ya que del 34,2 % de cubierta forestal que posee el territorio nacional, el 51,7 % se encuentra en este departamento; a pesar de que Petén no se encuentre entre los primeros departamentos en cuanto a número de incidentes suscitados, los incendios forestales contribuyeron a disminuir la cobertura forestal del mismo en un 4,76 %. Además, estos eventos también afectaron el 6,92 % de toda la cobertura no forestal del departamento.

En el caso de la superficie forestal afectada por los incendios forestales, aunque el bosque de coníferas representa solamente un tercio del bosque de latifoliadas del territorio guatemalteco, el primero ha sido el más afectado por los incendios, puesto que el bosque de coníferas del país está conformado principalmente por el pino amarillo (*Pinus oocarpa*), que es una especie

arbórea que posee un bajo calor específico ($0,66 \text{ kcal/kg}^{\circ\text{C}}$); en otras palabras, el bosque de coníferas lo integran especies que necesitan absorber menor cantidad de calor, que las del bosque latifoliado, para aumentar su temperatura y por tanto alcanzar más fácilmente su punto de ignición.

Por otra parte, un el 62 % de los incendios forestales en el país se originan entre las 10:00 y 16:00 horas; prácticamente el mismo horario en que se registra la temperatura máxima del día. A esto se añade que la temporada de desarrollo de los incendios forestales coincide con la época seca.

A través de los histogramas de cantidad de incendios forestales por mes y los climadiagramas de cada uno de los departamentos del país, se hace evidente que (especialmente durante los meses de marzo y abril se incrementa el número de incidentes de este tipo) meses a los que corresponde el aumento de temperatura, descenso de la precipitación (la cual es nula o escasa) y la disminución de la humedad. Estas son condiciones que ayudan a mantener secos los materiales combustibles.

Todo ello hace evidente que la temporada de incendios depende de las condiciones climáticas. Principalmente la temperatura ambiental y humedad son las variables que favorecen y permiten la generación e intensificación de los incendios forestales dentro del país.

Por tanto se dividió el país en cuatro regiones, tomando en cuenta las características de temperatura ambiental y humedad relativa, ambas de las 13:00 horas, de las estaciones analizadas. Esto se utilizó para la posterior generación de los modelos numéricos de predicción de incendios forestales.

Los modelos se generaron a partir del índice de Chandler; para lograr la formulación de los mismos se determinó que el parámetro de sensibilidad es la humedad relativa. Con base en ello, los parámetros de humedad fueron los factores de ajuste para cada uno de los modelos numéricos y así obtener mejores resultados de predicción.

Para el establecimiento de los modelos numéricos de predicción de incendios forestales, se buscó que por lo menos el 85 % de los datos se situaran entre “bajo” y “muy alto” grado de peligro de generación de incendios forestales. Además, es indispensable mencionar que según los datos recabados, menos del 0,50 % de los incendios forestales se desarrollaron por causas naturales.

Es por ello que los modelos obtenidos para cada una de las regiones del país, lanzan datos de probabilidad de iniciación de incendios forestales con base en la temperatura ambiental y la humedad relativa, medidas a las 13:00 horas; pero principalmente establecen el grado de peligro de intensificación y aceleración del incendio, bajo las variables meteorológicas mencionadas, que se presentan en el momento de su generación.

Para la validación de los modelos numéricos se utilizó una estación meteorológica de cada una de las regiones, tomando en cuenta los datos diarios de enero, abril y septiembre del 2014; asimismo, se utilizaron los registros de incendios forestales ocurridos dentro de cada región durante el 2015.

Enero se tomó en cuenta ya que es el mes en que se da inicio a la temporada de incendios forestales; abril, debido a que es el mes que más incidentes reporta a lo largo de los años de observación, y septiembre, porque

generalmente registra la mayor cantidad de precipitación y por tanto es el mes en el que se presentan las condiciones meteorológicas que no favorecen el desarrollo ni la intensificación de los incendios forestales.

En cuanto a la región 1, se determinó que los incendios forestales se originaron bajo condiciones de temperatura entre los 25 °C y 40 °C y humedad relativa de 30 % a 90 %. A partir de los registros que se encontraban dentro de dichos rangos, se determinaron los parámetros de ajuste para el obtener el modelo numérico de predicción y se establecieron los que dieron la mejor correlación, es decir la más cercana a 1 y los que revelaron el mejor porcentaje de datos (61,79 %) entre “moderado” y “muy alto”, en relación con el grado de peligro de ocurrencia de un incendio forestal.

Además, utilizando el modelo numérico propuesto para dicha región, el 88 % de los datos se encuentra entre “bajo” y “muy alto” grado de peligro de incendio forestal.

Los datos de la validación del modelo generado para la región 1 muestran la tendencia que el 92 % de los días de enero fueron muy altamente propensos a la intensificación de un incendio forestal y el 8 % restante, según las condiciones meteorológicas, presentaron un grado de peligro moderado de sufrir un incidente de esta clase. Mientras tanto, el 100 % de los días de abril y el 30 % de los de septiembre, mostraron probabilidad muy alta a sufrir incidentes de este tipo. También el mes de septiembre develó que un 13 % de los días no presentó condiciones meteorológicas que generaran riesgo de intensificación de un incendio forestal.

La región 1 comprende departamentos que prácticamente todo el año presentan altas temperaturas y humedades relativas bajas, principalmente entre

las 12:00 y 15:00 horas. Como consecuencia, el modelo formulado para la región proporcionó datos esperados para los meses analizados.

Efectivamente, para los incendios ocurridos en el 2015, según el modelo numérico, existió alerta (grado de peligro de “moderado” a “muy alto”) de incendio forestal los días en que estos se desarrollaron; abril es el mes que más porcentaje de aciertos presenta, correspondiente al 93,33 %; mientras que enero muestra el 46,67 %; por otro lado, en septiembre no se muestra ningún acierto en cuanto a los días en que existió alerta de incidente; no obstante el porcentaje de los días en que el grado de peligro lanzó valores entre “nulo” y “bajo” asciende al 70,00 % de aciertos.

Por todas las razones expuestas, se hace evidente el buen funcionamiento del modelo numérico de predicción de zonas potenciales para el desarrollo de incendios forestales, sugerido para la región 1.

Respecto de la región 2, los incendios forestales igualmente se dieron entre los 25 °C y 40 °C de temperatura; no obstante la humedad presenta valores entre 30 % y 70 %. Sin embargo, la mayor densidad de incidentes (38,24 %) se suscitó entre los 30 °C y 40 °C, con humedades relativas del 35 % al 60 %. Con el modelo propuesto se llegó a obtener el 82 % de los datos entre los valores que indican de moderada a muy alta probabilidad de propagación de incendios forestales. Los factores de ajuste presentados en el modelo numérico son los que cuentan con las correlaciones más cercanas a 1.

De igual forma, para la validación del modelo propuesto para la región 2, es de esperar que durante el mes de abril se presenten las condiciones propicias para propagar un incendio forestal y durante los meses de la época lluviosa, todo lo contrario; esto, porque dicha región la integran departamentos de climas

húmedos. Justamente, el mes que develó el mayor índice de peligro fue abril, el cual presentó humedades relativas y temperaturas ambientales muy altamente intensificadoras de incendios forestales, el 80 % de los días. Por otro lado, en septiembre el 90 % de los días mantuvo condiciones meteorológicas que mostraron una peligrosidad de generación de incendios forestales entre “nulo” y “bajo”.

Asimismo, según el análisis de los incendios forestales desarrollados dentro de la región 2 en el 2015, enero tiene un porcentaje de aciertos igual a 66,67 % y abril un 62,50 %. Mientras tanto, en septiembre se tiene un porcentaje de aciertos del 86,67 % para los días en los que no se originaron incendios forestales. Con base en todo lo anterior, la medición del grado de peligrosidad de intensificación de un evento de este tipo, para dicha región, se puede realizar mediante el modelo de predicción planteado.

Ahora bien, para la obtención de los parámetros de ajuste del modelo numérico de la región 3, se logró establecer previamente, que la temperatura ambiente y humedad relativa presentes durante la ocurrencia de los incendios, se encuentran entre 20 °C y 30 °C y 10 % y 50 %, respectivamente. Mediante la ecuación generada se obtuvo un 86 % de los datos entre valores que revelan el grado de ocurrencia de incendio forestal entre “moderado” y “muy alto” y además la correlación de las variables es cercana a 1.

Para llevar a cabo la validación de este modelo, se tomó en cuenta que esta región se encuentra conformada por departamentos con climas templados, es decir humedades relativas altas y temperaturas que por lo general no exceden a los 30 °C.

En efecto, los valores del índice de Chandler obtenidos para la región 3 mostraron que en el inicio de la temporada de incendios, la probabilidad de que se genere un incidente es muy alta el 39 % de los días; y para el mes de abril el 87 % de los mismos. Para la época lluviosa no existe el grado de peligro “muy alto” de que ocurran incendios forestales, por el contrario los grados de peligro “nulo” y “bajo” se presentan en más del 85 % de los días analizados, concentrándose el 50 % en peligrosidad nula.

También es importante mencionar que se analizaron los incendios para la región 3, que ocurrieron en el 2015. Según los meses examinados, en lo que respecta a alerta de incendios forestales, los días de abril tienen un 96,55 % de aciertos y los de enero un 45,00 %; Sin embargo en abril no se presentan aciertos para dicha alerta, pero en lo referente a los días que no muestran alerta de incidentes, es decir, los días en los que la peligrosidad es “nula” o “baja” el porcentaje de aciertos es igual a 86,67 %; y por lo tanto, es viable utilizar el modelo numérico de predicción de incendios propuesto para dicha región.

Por otro lado, se encontró que el rango de temperatura, en el que se desarrolla un incendio forestal dentro de la región 4, va de los 29 °C a los 34 °C; mientras tanto, la humedad relativa varía entre el 60 % y 90 %. Se planteó el modelo numérico de predicción de incendios forestales para esta región, a pesar de la limitada cantidad de datos con la que se contó para establecerlo. Por tanto, el 50 % de los datos se concentró en un grado de peligro bajo y el resto se distribuyó entre moderado (25 %), alto (12,50 %) y muy alto (12,50 %).

La correlación entre los factores de ajuste determinados, fue la mejor entre los modelos propuestos, siendo la que más se acercó a 1 para los diferentes parámetros de ajuste. Sin embargo, la validación laza valores muy altos, ya que para el inicio de la época seca el 100 % de los días se centraliza en un grado

de peligro de incendio forestal “muy alto” y septiembre también muestra un 13,33 % de los días en dicho rango. Aunque también en este último mes, el 60 % de los días presentan condiciones meteorológicas que originan, que los datos del modelo numérico se sitúen entre nulo y bajo grado de peligro de incendio forestal.

Esta región comprende a los departamentos de la bocacosta del país, departamentos que poseen el menor porcentaje de recurrencia de incendios forestales. El clima de la región es bastante cálido, presenta condiciones de altas temperatura durante todo el año, pero la humedad que se registra también es bastante elevada. Por tanto la probabilidad de incendios forestales, tal como muestran los histogramas de cantidad de incendios forestales por mes, debe tender a bajo o nulo.

Además, durante el 2015 solamente se tiene registro de seis incidentes dentro de la región 4; para la fecha en que se dieron los incendios forestales, el índice muestra que existía una “muy alta” probabilidad de existencia de un incidente de esta clase, claramente basado en las condiciones de temperatura ambiental y humedad relativa a las 13:00 horas; pero tan solo se obtuvo un porcentaje de aciertos del 6,67 % en abril y 3.33 % en enero; y para el mes de septiembre el porcentaje de aciertos, en cuanto a la no ocurrencia de incendios, es del 33,33 %. Lo que hace notoria la limitada cantidad de información con la que se contó para la formulación del modelo de la región 4.

CONCLUSIONES

1. Se determinó que los incendios forestales que se presentan a lo largo y ancho del territorio guatemalteco se deben al aumento de la temperatura y la disminución de la humedad relativa y de la precipitación; durante la época seca se posee mayor riesgo de que estos se generen, y se encontró que principalmente ocurren en el mes de abril. Además se comprobó que fenómenos naturales como el de El Niño repercuten en el clima del país, propiciando condiciones meteorológicas que ayudan a la generación y propagación del fuego en los bosques; y también que las condiciones meteorológicas que predominan entre las 10:00 y 16:00 horas colaboran con la intensificación del fuego; siendo este el horario en que se reportaron más incendios forestales.
2. Diferentes variables meteorológicas contribuyen con la generación e intensificación de los incendios forestales, no obstante se identificó que la humedad relativa y la temperatura ambiental, que se presentan a las 13:00 horas, son condicionantes para la intensificación, extensión y propagación de los mismos, dentro del país.
3. Guatemala es un país que posee diferentes y muy variadas regiones climáticas, es por ello que se crearon cuatro modelos numéricos de predicción de zonas potenciales para el desarrollo de incendios forestales, basados en los diferentes aspectos climáticos de cada región. Justamente la humedad relativa y la temperatura ambiental son las variables con las que se logró obtener estos diferentes modelos numéricos; los cuales representan una nueva e innovadora herramienta

para el país en el tema de prevención y control de incendios forestales. Esta herramienta proporciona una escala para conocer el peligro de generación de un incendio forestal que posee cinco rangos de medición del mismo: nulo (menor que 50,00), bajo (50,00 - 74,99), moderado (75,00 - 89,99), alto (90,00 - 97,50) y muy alto (mayor que 97,50).

4. Se realizó la validación de cada uno de los cuatro modelos numéricos de predicción de incendios forestales, mediante los datos diarios de enero, abril y septiembre de los años 2014 y 2015. En enero (que da inicio a la temporada de incendios forestales) se obtuvieron los porcentajes de aciertos de 46,67 %, 66,67 %, 45,00 % y 3,33 %; para las regiones 1, 2, 3 y 4, respectivamente. En abril (al que corresponde el mayor número de incendios ocurridos a través del periodo observado) se presenta el porcentaje de aciertos equivalente al 93,33 % para la región 1, 62,50 % en la región 2, 96,55 % en la región 3 y 6,67 % para la región 4. Septiembre (que reporta mayores valores de precipitación y humedad relativa durante la época lluviosa) no presentó aciertos para las alertas de incendio forestal, pero en el caso de los días en que los valores de peligrosidad se situaron entre “nulo” y “bajo” el porcentaje de aciertos asciende a: 70,00 % en la región 1, 86,67 % en las regiones 2 y 3 y 33,33 % en la región 4; todo esto hace notar que el modelo funciona efectivamente, pero proporciona mejores resultados durante la época seca del año.

RECOMENDACIONES

1. Integrar los modelos numéricos propuestos por este estudio en el modelo de pronóstico meteorológico WRF que ejecuta diariamente el Insivumeh, utilizando las variables de humedad relativa y temperatura de pronóstico.
2. Desarrollar un sistema que permita implementar e integrar fácil y efectivamente los modelos numéricos de predicción de zonas potenciales para el desarrollo de incendios forestales, con el fin de lograr una mejor metodología de prevención y control de los mismos.
3. Realizar una mejor coordinación entre las instituciones que conforman el Sipecif, para llevar a cabo un plan nacional que procure e involucre los diferentes temas inmersos en la generación y propagación de incendios forestales.
4. Continuar con el desarrollo de nuevos modelos numéricos de predicción de incendios forestales basados en índices de predicción, que involucren otras variables meteorológicas o sean enfocados en otros aspectos que influyen en la ocurrencia de los incendios de este tipo, como la topografía y el tipo de vegetación.

BIBLIOGRAFÍA

1. ACUÑA VARGAS, Alex Eduardo. *Plan de protección contra incendios forestales para la comuna de Maullín, provincia de Llanquihue, región de Los Lagos*. Trabajo de graduación de Ing. Forestal. Valdivia, Chile: Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Forestales. 2008. 41 p.
2. BONILLA, Roberto J. *Guía técnica en prevención y control de incendios forestales*. Guatemala: PROPETEN - Conservación Internacional, 2001. 25 p.
3. CHUVIECO SALINERO, Emilio. *Detección y análisis de incendios forestales desde satélites de teledetección*. Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Departamento de Geografía. Universidad de Alcalá. X Programa de Promoción de la Cultura Científica y Tecnológica. 2009, vol. 103, núm. 1, 415 p.
4. DOMÍNGUEZ MARTÍN, Santiago. *La física de un índice predictivo de riesgo de incendio forestal*. Trabajo de graduación doctoral. Salamanca, España: Universidad de Salamanca, Facultad de Ciencias Agrarias y Ambientales. 2008. 385 p.
5. GÁLVEZ, Juventino; LÓPEZ, Elmer; SANDOVAL, César. "Bosques: pérdida incontenible". En: *Perfil Ambiental de Guatemala 2010-2012. Vulnerabilidad local y creciente construcción de riesgo*. Guatemala: Instituto de Agronomía, Recursos Naturales y

Ambiente. Universidad Rafael Landívar, 2012. 440 p. ISBN: 978-9929-587-71-7.

6. MALEN DENHAM, Mónica. *Predicción de la evolución de los incendios forestales. Guiada dinámicamente por los datos*. Trabajo de graduación doctoral. Barcelona, España: Universidad Autónoma de Barcelona, Escola Tecnica Superior d'Enginyeria. 2009. 143 p.
7. MUÑOZ ROBLES, Carlos Alfonso. *Elaboración de un modelo espacial de peligro de incendios forestales*. Trabajo de graduación de Maestría en Ciencias Forestales. Nuevo León, México: Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Forestales. 2011. 87 p.
8. PRADO FAJARDO, María Cristina. *Diseño de un modelo SIG para la determinación de zonas de riesgo por incendios forestales, en los cerros orientales de la ciudad de Bogotá*. Trabajo de graduación de Ing. Agrícola. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería Agrícola. 2014. 109 p.
9. QUIÑÓNEZ BERGANZA, Gerardo Osvely. *Sistematización de la gestión del riesgo de incendios forestales en el departamento de Chimaltenango*. Trabajo de graduación de Ing. Agrónoma en Recursos Naturales Renovables. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Agronomía. 2006. 40 p.
10. RODRÍGUEZ ASERETTO, Darío. *Sistema adaptativo para la predicción de incendios forestales basado en estrategias estadístico-evolutivas*. Trabajo de tesis de maestría en Informática Avanzada.

Barcelona, España: Departamento de Arquitectura de Computadoras y Procesamiento Paralelo. Universidad Autónoma de Barcelona, 2007. 74 p.

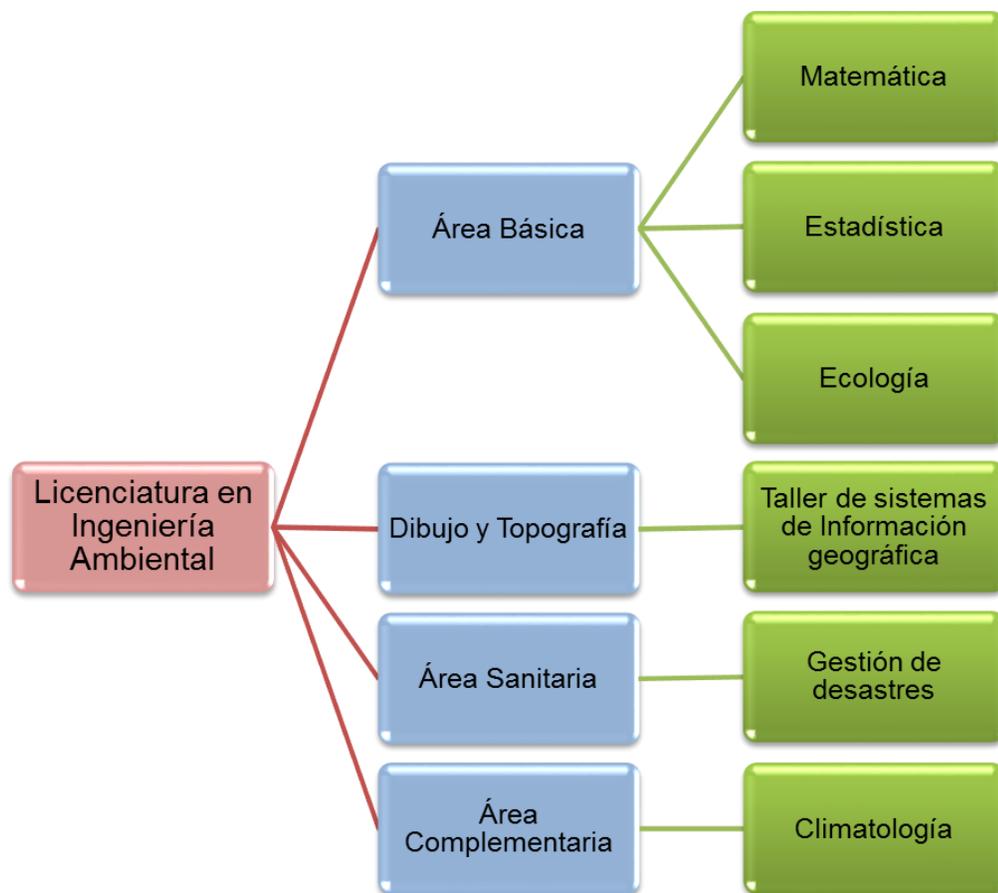
11. SÁNCHEZ HUERTA, José Benito. *Análisis de algunas variables meteorológicas y su área de influencia, en ciudad universitaria, D.F., durante el período 1963 a 1983*. Trabajo de graduación Licenciatura en Geografía. México D.F.: Universidad Autónoma de México, Facultad de Filosofía y Letras. 1990. 113 p.
12. SAROCHAR, Horacio E. *Introducción a la meteorología general*. [en línea]. <http://extension.fcaglp.unlp.edu.ar/content/obs/descargas/Introduccion_a_la_Meteorologia_I.pdf>. [Consulta: 5 de agosto de 2015].
13. UNIÓN EUROPEA. *Revisión del estado del arte en la modelización de propagación de incendios forestales*. Proyecto: SATFOR. CÓDIGO: SOE2/P2/E457. [en línea]. <http://4.interreg-sudoe.eu/contenido-dinamico/libreriaficheros/FEA6DA69-49C7A4_Ef-FD3D-8E61C0A62EF3.pdf>. [Consulta: 10 de octubre de 2014].
14. VALDIVIA ARREDONDO, José Aníbal. *Análisis y propuesta de un método de prevención de incendios forestales utilizando redes de sensores inalámbricos (WSN)*. Trabajo de graduación de Ing. Civil Electrónica. Valdivia, Chile: Universidad de Austral de Chile, Facultad de Ciencias de la Ingeniería. 2013. 180 p.
15. VILAR DEL HOYO, Lara. *Elaboración de modelos espaciales predictivos de ocurrencia de incendios forestales asociada a la*

actividad humana. Trabajo de graduación doctoral. Alcalá, España: Universidad de Alcalá, Departamento de Geografía. 2009. 180 p.

16. ZÚÑIGA LÓPEZ, Ignacio; CRESPO DEL ARCO, Emilia. *Meteorología y Climatología*. 2a ed. Madrid, España: Universidad Nacional de Educación a Distancia, 2010. 262 p. ISBN: 9788436260823.

APÉNDICES

Apéndice 1. Requisitos académicos



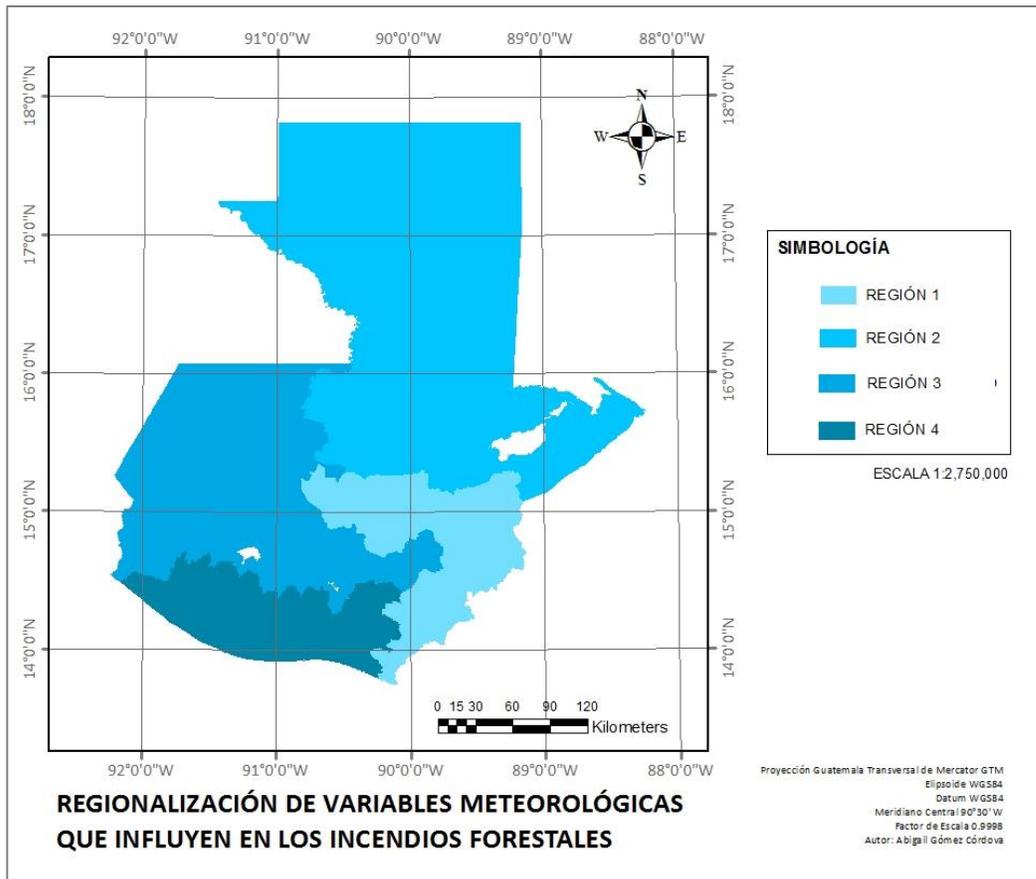
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. **Árbol del problema**



Fuente: elaboración propia.

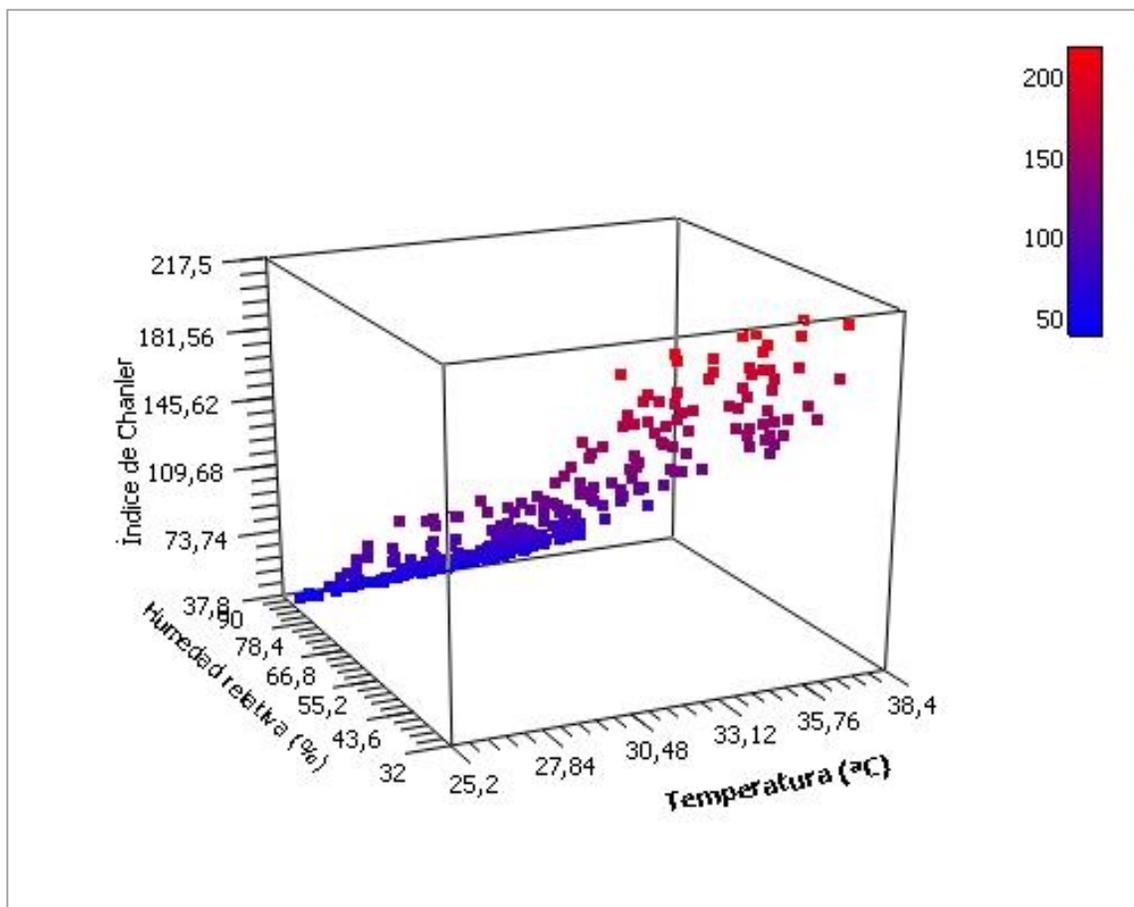
Apéndice 4. **Mapa de regionalización de variables meteorológicas que influyen en el desarrollo de incendios forestales**



Fuente: elaboración propia, utilizando ArGIS 10.2.2.

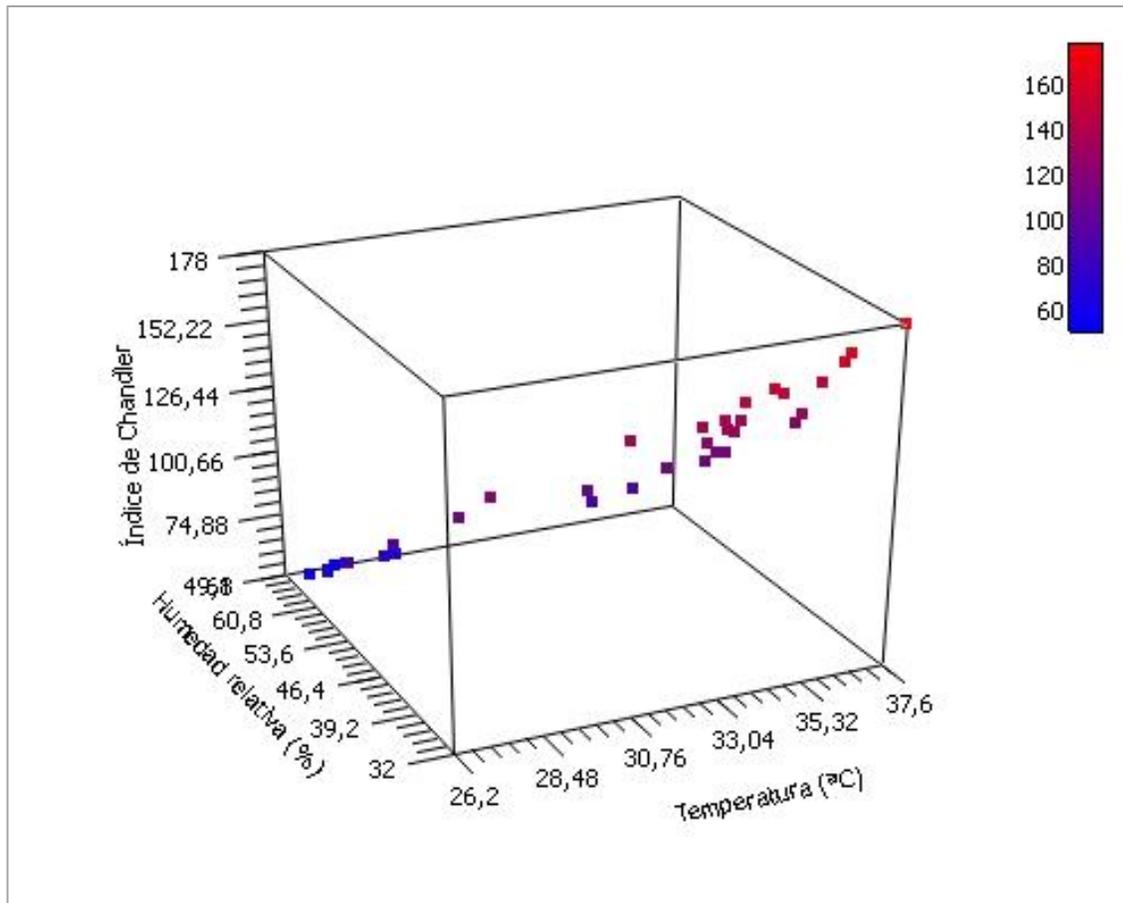
Apéndice 5. **Gráficas tridimensionales de las variables meteorológicas utilizadas para la generación del modelo numérico**

Apéndice 5a. **Gráfica tridimensional utilizando la ecuación generada para la región 1**



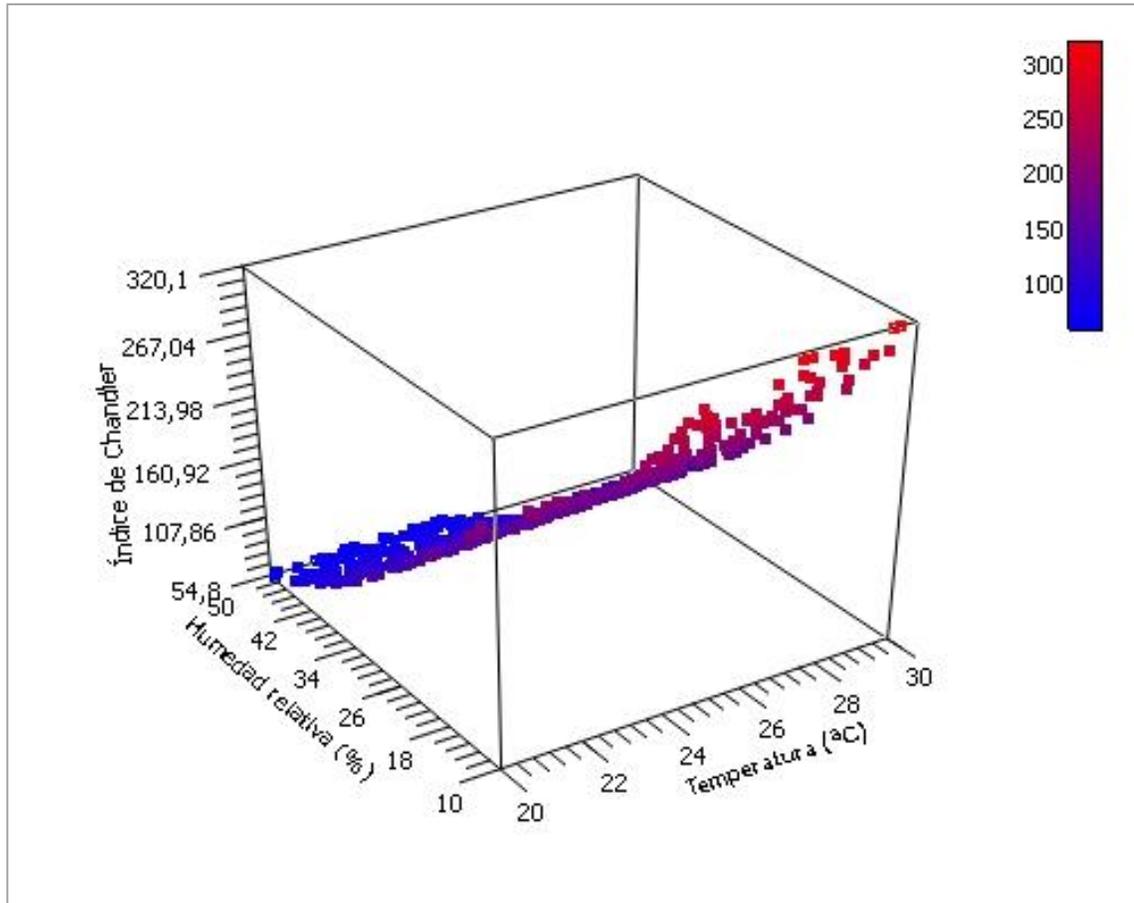
Fuente: elaboración propia, utilizando QPlot 2.2.

Apéndice 5b. **Gráfica tridimensional utilizando la ecuación generada para la región 2**



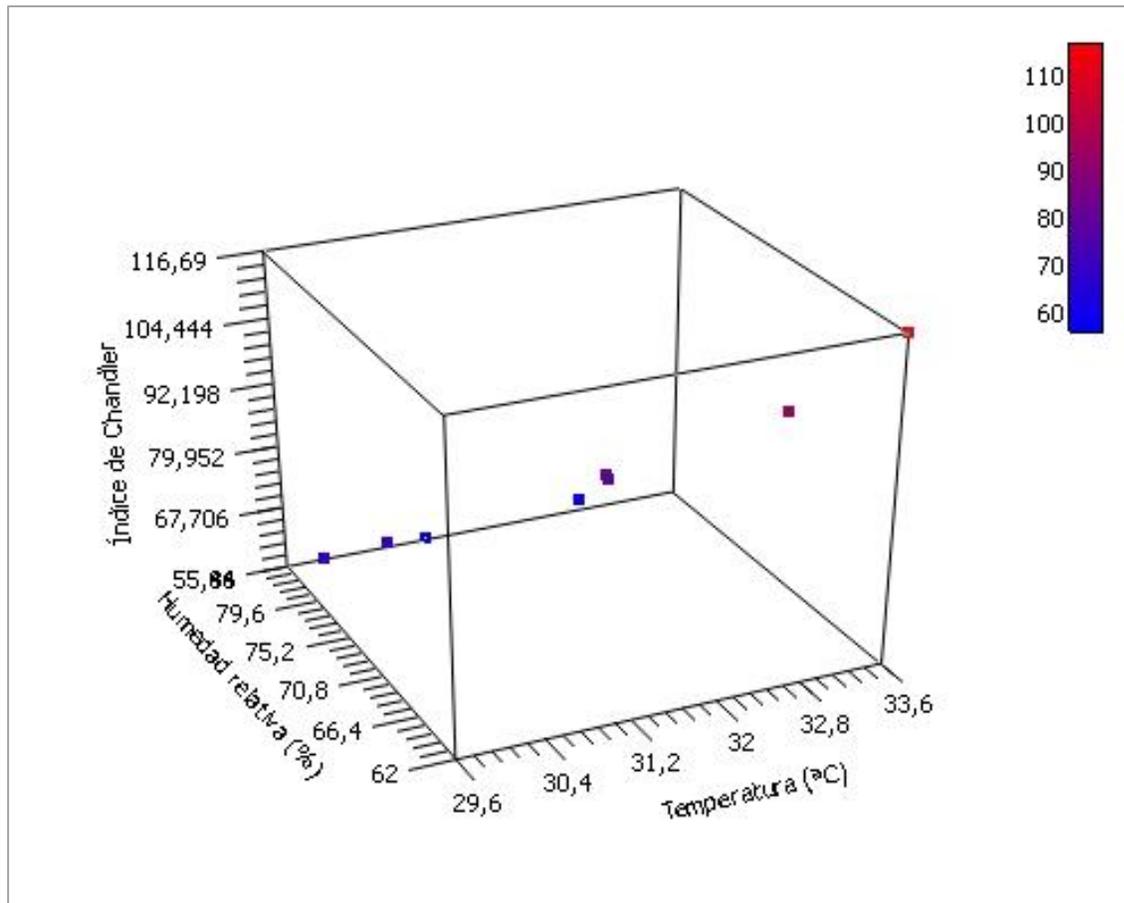
Fuente: elaboración propia, utilizando QPlot 2.2.

Apéndice 5c. **Gráfica tridimensional utilizando la ecuación generada para la región 3**



Fuente: elaboración propia, utilizando QPlot 2.2.

Apéndice 5d. **Gráfica tridimensional utilizando la ecuación generada para la región 4**



Fuente: elaboración propia, utilizando QPlot 2.2.