

# **UN MODELO DE RIESGO DE INCENDIO EN MICHOACÁN, MÉXICO**

Sonia María Juárez Orozco

# Tabla de Contenidos

---

<b>AGRADECIMIENTOS</b>	<b>4</b>
<b>RESUMEN EJECUTIVO</b>	<b>11</b>
<b>1 INTRODUCCIÓN</b>	<b>11</b>
<b>2 MÉTODO</b>	<b>11</b>
<b>2.1 FASE EXPLORATORIA</b>	<b>11</b>
<b>2.2 FASE DE MODELAJE</b>	<b>11</b>
2.2.1 SUBMODELO COMBUSTIBLE	12
2.2.2 SUBMODELO IGNICIÓN	12
2.2.3 SUBMODELO DETECCIÓN	13
2.2.4 SUBMODELO RESPUESTA	13
2.2.5 MODELO ESTÁTICO DE RIESGO DE INCENDIO	13
2.2.6 MODELO MULTI-TEMPORAL DE RIESGO DE INCENDIO (SUBMODELO CLIMA)	13
<b>2.3 VALIDACIÓN</b>	<b>14</b>
<b>3 RESULTADOS</b>	<b>14</b>
<b>3.1 FASE I. EXPLORATORIA</b>	<b>14</b>
3.1.1 FACTORES BIOFÍSICOS QUE AFECTAN LA INCIDENCIA Y COMPORTAMIENTO DE INCENDIOS FORESTALES	14
<b>3.2 FASE II. MODELAJE</b>	<b>16</b>
3.2.1 SUBMODELO COMBUSTIBLE	16
3.2.2 SUBMODELO IGNICIÓN	16
3.2.3 SUBMODELO DETECCIÓN	16
3.2.4 SUBMODELO RESPUESTA	17
3.2.5 MODELO ESTÁTICO DE RIESGO DE INCENDIO	17
3.2.6 MODELO MULTI-TEMPORAL DE RIESGO DE INCENDIO (SUBMODELO CLIMA)	18
<b>3.3 FASE III. VALIDACIÓN</b>	<b>18</b>
<b>4 CONCLUSIONES</b>	<b>18</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>21</b>

<b>1. INTRODUCTION</b>	<b>23</b>
<hr/>	
<b>1.1 BACKGROUND</b>	<b>23</b>
1.1.1 FOREST FIRES AND INFLUENCING FACTORS	23
1.1.2 CLASSIFICATION OF FOREST FIRE	24
1.1.3 FOREST FIRES: EFFECTS AND CONSEQUENCES	25
1.1.4 FIRE HAZARD, RISK AND DANGER DEFINITIONS	25
1.1.5 THE ROLE OF REMOTE SENSING AND GIS IN FIRE MODELLING	26
1.1.5.1 Active fires	27
1.1.5.2 Burnt scars	27
1.1.5.3 Forest fires modelling	28
1.1.6 FOREST FIRES IN MEXICO	29
1.1.1. ACTUAL FIRE COMBATING AND PREVENTION IN MEXICO	30
<b>1.2 RESEARCH PROBLEM</b>	<b>31</b>
<b>1.3 RATIONALE</b>	<b>32</b>
<b>1.4 RESEARCH OBJECTIVES AND QUESTIONS</b>	<b>32</b>
<b>2 STUDY AREA</b>	<b>33</b>
<hr/>	
<b>2.1 LOCATION</b>	<b>34</b>
<b>2.2 CLIMATE</b>	<b>34</b>
<b>2.3 VEGETATION</b>	<b>36</b>
<b>2.4 LAND USE</b>	<b>39</b>
<b>2.5 POPULATION</b>	<b>40</b>
<b>3 METHOD</b>	<b>41</b>
<hr/>	
<b>3.1 EXPLORATORY PHASE</b>	<b>41</b>
3.1.1 LITERATURE REVIEW AND SELECTING FACTORS INFLUENCING FOREST FIRE	41
3.1.2 DATA PROCESSING	41
1. STUDY AREA DEMARCATION	42
3.1.3 VEGETATION TYPE MAP IMPROVEMENT	44
3.1.4 BURNT AREA MAPPING	44
3.1.5 ANALYSIS OF FACTORS INFLUENCING FOREST FIRES	44
<b>3.2 MODELING PHASE</b>	<b>45</b>
3.2.1 FUEL RISK SUB-MODEL	46
3.2.1.1 Land cover index	47
3.2.1.2 Slope index	50
3.2.1.3 Elevation index	50
3.2.1.4 Aspect index	51
3.2.2 IGNITION RISK SUB-MODEL	51
3.2.3 FIRE DETECTION RISK SUB-MODEL.	52
3.2.4 RESPONSE RISK SUB-MODEL	53
3.2.4.1 On-road response	54

3.2.4.2	Off-road response	54
3.2.5	STATIC FIRE RISK MODEL	56
3.2.6	WEATHER RISK SUB-MODEL.	56
<b>3.3</b>	<b>VALIDATION PHASE</b>	<b>62</b>
<b>3.4</b>	<b>MATERIALS</b>	<b>63</b>
3.4.1	CARTOGRAPHIC DATA AND IMAGERY	63
3.4.1.2	IMAGES	63
A)	MODIS IMAGES	63
B)	ASTER IMAGES	64
3.4.2	GROUND RECORDS	65
C)	COFOM RECORDS	65
<b>4</b>	<b>RESULTS AND DISCUSSION</b>	<b>66</b>
<hr/>		
<b>4.1</b>	<b>EXPLORATORY PHASE</b>	<b>66</b>
4.1.1	BURNT AREA MAP	66
4.1.2	ANALYSIS OF BIOPHYSICAL FACTORS INFLUENCING FOREST FIRE	67
4.1.2.1	Vegetation type	67
4.1.2.2	Elevation	68
4.1.2.3	Slope	69
4.1.2.4	Aspect	70
4.1.2.5	Ignition factors	70
4.1.2.6	Weather	71
<b>4.2</b>	<b>MODELLING PHASE</b>	<b>72</b>
4.2.1	FUEL RISK SUB-MODEL	72
4.2.2	IGNITION RISK SUB-MODEL	73
4.2.3	WEATHER RISK SUB-MODELS	73
4.2.4	DETECTION RISK SUB-MODEL	74
4.2.5	RESPONSE RISK SUB-MODEL	75
4.2.6	STATIC FIRE RISK MODEL	75
<b>4.3</b>	<b>VALIDATION</b>	<b>79</b>
<b>4.4</b>	<b>RELEVANCE OF THE OBTAINED RESULTS</b>	<b>81</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS</b>	<b>83</b>
<hr/>		
<b>5.1</b>	<b>CONCLUSION</b>	<b>83</b>
<b>5.2</b>	<b>RECOMMENDATIONS</b>	<b>84</b>
<b>REFERENCES</b>		<b>86</b>
<hr/>		
<b>APPENDICES</b>		<b>93</b>
<hr/>		
<b>A.</b>	<b>LAND COVER MAP</b>	<b>93</b>

<b>B. VEGETATION TYPES</b>	<b>93</b>
<b>C. WEATHER SUB-MODELS</b>	<b>95</b>
<b>D. STUDY CASE: GIS FOREST FIRE RISK MODEL (IN SPANISH)</b>	<b>99</b>

# List of figures

---

FIGURE 1-1. MAIN CAUSES OF FOREST FIRES IN 1998, MEXICO .....	29
FIGURE 2-1 STUDY AREA LOCALIZATION IN AN ASTER IMAGE OF MICHOACÁN, MEXICO.....	35
FIGURE 2-2. CLIMATOGRAPHS FROM (A) LOS REYES STATION (SUBTROPICAL) AND (B) CARAPAN STATION (TEMPERATE) IN MICHOACÁN, MEXICO.....	36
FIGURE 3-1. MICHOACÁN’S MUNICIPALITIES WITH HIGHEST PERCENTAGE OF FOREST FIRES IN FOUR YEARS.....	43
FIGURE 3-2 FACTOR ANALYSIS .....	45
FIGURE 3-3. FUEL RISK SUB-MODEL .....	46
FIGURE 3-4. SCHEMATIC OF A FIRE ON A SLOPE.....	50
FIGURE 3-5. IGNITION RISK SUBMODEL .....	52
FIGURE 3-6 DETECTION RISK SUB-MODEL .....	53
FIGURE 3-7 RESPONSE RISK SUB-MODEL .....	54
FIGURE 3-8. A COMPARISON OF WALKING MODEL.....	55
FIGURE 3-9. WEATHER RISK SUB-MODEL .....	57
FIGURE 3-10. LINEAR REGRESSION BETWEEN ELEVATION AND TEMPERATURE FOR THE MONTHS JANUARY TO JUNE .....	60
FIGURE 3-11. LINEAR REGRESSION BETWEEN ELEVATION AND TEMPERATURE FOR THE MONTHS JULY TO DECEMBER .....	61
FIGURE 4-1. TWO EXAMPLES OF A DIGITALIZED BURNT AREA. SETTLEMENTS SHOWN IN THIS PICTURE: 1) SANTA CLARA DE VALLADARES, 2) LOS LIMONES, 3) ETUCUARO, 4) VALLE DE GUADALUPE, 5) GÓMEZ FARIAS 6) CHILCHOTA .....	66
FIGURE 4-2 STUDY AREA BURNT AREA MAP.....	67
FIGURE 4-3. ALTITUDINAL DISTRIBUTION OF LAND COVER CLASSES .....	68
FIGURE 4-4. ALTITUDINAL DISTRIBUTION OF BURNT AREAS.....	69
FIGURE 4-5. BURNT SCAR DISTRIBUTION PER SLOPE CLASS.....	69
FIGURE 4-6 BURNT SCAR DISTRIBUTION PER ASPECT CLASS.....	70
FIGURE 4-7. BURNT SCAR DISTRIBUTION ACCORDING TO DISTANCE TO (A) AGRICULTURE FIELDS, (B) GRASSLANDS, (C) SETTLEMENTS, (D) ROADS.....	71
FIGURE 4-8. FIRE FREQUENCY IN THE DRY SEASON FROM 2003 TO 2006 .....	72
FIGURE 4-9. FIRE FREQUENCY AND TEMPERATURE (°C), TEMPERATURE OF THE FIRST SIX MONTHS OF THE YEAR..	72
FIGURE 4-10 FIRE FREQUENCY OF THE FIRST SIX MONTHS OF THE YEAR. PP = MEAN PRECIPITATION (MM) AND E= EVAPORATION.....	72
FIGURE 4-11. PERCENTAGE OF BURNT AREA BY FIRE RISK CLASS USING EQUATIONS 1, 2 AND 3 .....	76
FIGURE 4-12. FUEL RISK MAP .....	77
FIGURE 4-13. IGNITION RISK MAP .....	77
FIGURE 4-14. DETECTION MAP .....	77
FIGURE 4-15. RESPONSE RISK MAP .....	77
FIGURE 4-16. STATIC FIRE RISK .....	78
FIGURE 4-17. AUGUST FIRE RISK .....	78
FIGURE 4-18. APRIL FIRE RISK.....	78
FIGURE 4-19. DISTRIBUTION OF THE BURNT SCARS IN THE FIRE RISK CATEGORIES OF THE STATIC RISK MODEL .....	80
FIGURE 4-20. ROC CURVE. LINES OA CORRESPOND TO A PERFECT MODEL, OM TO A NULL MODEL AND OBM TO THE STATIC RISK MODEL.....	80

# List of tables

---

TABLE 3-1 COMPARISON BETWEEN COFOM REPORTS AND MODIS HOT SPOT .....	43
TABLE 3-2. CHARACTERISTICS OF LAND COVER TYPES AND LAND COVER INDEX RATING.....	49
TABLE 3-3. SLOPE INDEX.....	50
TABLE 3-4. ELEVATION INDEX .....	50
TABLE 3-5. ASPECT INDEX .....	51
TABLE 3-6 DISTANCE TO ROADS, AGRICULTURE FIELDS AND GRASSLANDS INDICES.....	52
TABLE 3-7. DETECTION RISK INDEX .....	53
TABLE 3-8 ON-ROAD RESPONSE INDEX .....	54
TABLE 3-9. SLOPE FRICTION INDEX .....	55
TABLE 3-10. ELEVATION FRICTION INDEX .....	55
TABLE 3-11 LAND COVER FRICTION INDEX.....	56
TABLE 3-12 TEMPERATURE INDEX .....	58
TABLE 3-13 PRECIPITATION INDEX.....	59
TABLE 3-14. CARTOGRAPHY AND IMAGERY USED IN THE STUDY .....	63
TABLE 3-15 EOS MOD_14, AND MOD_40 SATELLITE IMAGE’S CHARACTERISTICS [111] .....	63
TABLE 4-1. BURNT SCARS PER VEGETATION TYPES .....	68
TABLE 4-2. BURNT SCARS PER SLOPE CLASS.....	69
TABLE 4-3. AREA (%) PER RISK CATEGORY OF FUEL RISK SUB-MODEL .....	72
TABLE 4-4. AREA (%) PER RISK CATEGORY OF THE IGNITION RISK SUB-MODEL .....	73
TABLE 4-5, AREA (%) PER RISK CATEGORY OF APRIL SUB-MODEL .....	74
TABLE 4-6. AREA (%) PER RISK CATEGORY OF AUGUST SUB-MODEL .....	74
TABLE 4-7. AREA (%) PER RISK CATEGORY OF THE DETECTION SUB-MODEL .....	74
TABLE 4-8. AREA (%) PER RESPONSE CATEGORY OF THE RESPONSE SUB-MODEL.....	75
TABLE 4-9. AREA (%) PER RISK CATEGORY OF STATIC FIRE RISK SUB-MODEL.....	76
TABLE 4-10. BURNT AREA (%) PER FIRE RISK CATEGORY FOR THE FUEL SUB-MODEL .....	81
TABLE 4-11. BURNT AREA (%) PER FIRE RISK CATEGORY FOR THE DETECTION SUB-MODEL .....	81
TABLE 4-12. BURNT AREA (%) PER FIRE RISK CATEGORY FOR THE IGNITION SUB-MODEL .....	81
TABLE 4-13. BURNT AREA (%) PER FIRE RISK CATEGORY FOR THE RESPONSE SUB-MODEL .....	81
TABLE 4-14. BURNT AREA (%) PER FIRE RISK CATEGORIES FOR THE STATIC SUB-MODEL.....	81
TABLE 4-15. BURNT AREA (%) PER FIRE RISK CATEGORY FOR THE MONTH OF APRIL .....	81
TABLE 4-16. BURNT AREA (%) PER FIRE RISK CATEGORY FOR THE MONTH OF AUGUST .....	81
TABLE 0-1. BURNT AREA (%) PER FIRE RISK CATEGORY FOR THE MONTH OF JANUARY.....	98
TABLE 0-2. BURNT AREA (%) PER FIRE RISK CATEGORY FOR THE MONTH OF FEBRUARY .....	98
TABLE 0-3. BURNT AREA (%) PER FIRE RISK CATEGORY FOR THE MONTH OF MARCH.....	98
TABLE 0-4. BURNT AREA (%) PER FIRE RISK CATEGORY FOR THE MONTH OF MAY.....	98
TABLE 0-5. BURNT AREA (%) PER FIRE RISK CATEGORY FOR THE MONTH OF JUNE.....	98
TABLE 0-6. BURNT AREA (%) PER FIRE RISK CATEGORY FOR THE MONTH OF JULY.....	98
TABLE 0-7. BURNT AREA (%) PER FIRE RISK CATEGORY FOR THE MONTH OF SEPTEMBER .....	98
TABLE 0-8. BURNT AREA (%) PER FIRE RISK CATEGORY FOR THE MONTH OF OCTOBER .....	98
TABLE 0-9. BURNT AREA (%) PER RISK CATEGORY FOR THE MONTH OF NOVEMBER .....	98
TABLE 0-10. BURNT AREA (%) PER FIRE RISK CATEGORY FOR THE MONTH OF DECEMBER.....	98

# Resumen ejecutivo

---

## 1 INTRODUCCIÓN

La presencia de incendios se ha incrementado significativamente en tamaño, frecuencia e intensidad alrededor del mundo. México, un país megadiverso, presenta fuegos recurrentes especialmente en los años afectados por el fenómeno meteorológico de El Niño. Sin embargo, los esfuerzos del gobierno para la prevención de incendios aún son insuficientes para reducir su frecuencia e intensidad. Aunado a esto, la generación de mapas de riesgo de incendio forestal a escala media es aún escasa para la mayor parte del país. Para evitar la pérdida de bosques y desastres naturales relacionados con los incendios, México necesita desarrollar con alta eficiencia estrategias de prevención de incendios. Los incendios modifican su entorno provocando importantes cambios bióticos y abióticos en los ecosistemas. Dado que, no todos los ecosistemas se encuentran adaptados al creciente número de incendios forestales, éstos no solo llegan a causar daños a la biodiversidad sino también graves pérdidas socio-económicas. En México, Michoacán se encuentra entre los estados con mayor número de incendios al año. La principal causa de incendios en este estado son tanto la quema de pastizales como el descuido de fogatas. El objetivo general de este estudio es modelar el riesgo de incendios para una zona crítica del estado de Michoacán, México. Para ello el método se dividió en tres fases: Exploratoria, Modelización y Validación. El presente estudio integra las variables biofísicas y humanas dentro del modelo de riesgo de incendios. Se consideraron cuatro factores principales: 1) Combustible, 2) Ambiente físico, 3) Factores detonantes y 4) Prevención y supresión. De estos factores, el combustible es el más importante ya que es elemento indispensable para la ignición y la expansión del fuego.

## 2 MÉTODO

### 2.1 FASE EXPLORATORIA

La primera fase se enfocó en la realización de un mapa de áreas quemadas y en el análisis de factores biofísicos y sociales relacionados con los incendios. Para el mapeo de áreas quemadas se utilizó una imagen ASTER del año 2007 utilizando una combinación de bandas 3, 2, 1 en rojo, verde y azul. Dado que la imagen pertenece al final de la temporada de secas las áreas quemadas fueron fácilmente identificadas, del resto de coberturas, por su coloración negruzca. La digitalización de dichas áreas se llevó a cabo mediante la interpretación visual de la imagen. Las áreas quemadas identificadas en la imagen se cruzaron con los mapas de pendiente, orientación de ladera, altitud, tipo de vegetación y mapas de distancia a áreas agrícolas, pastizales, áreas urbanas y caminos. Dicho cruce permitió un análisis estadístico para determinar diferencias significativas en relación a los factores y la presencia de áreas quemadas. Las pruebas aplicadas fueron ANOVA para muestras normales y de varianzas homogéneas y Kruskal-Wallis para varianzas heterogéneas.

### 2.2 FASE DE MODELADO

En la segunda fase se modeló el riesgo de incendio forestal. El modelo se dividió en cinco submodelos elaborados con los factores analizados en la fase previa y el cálculo de detección y respuesta por parte de las autoridades. Los submodelos fueron nombrados según el factor principal en el que se enfocaron, siendo éstos: 1) Combustible, 2) Ignición, 3) Detección, 4) Respuesta y 5) Clima. Su construcción se



basó en índices lógicos basados en una exhaustiva revisión bibliográfica y conocimiento experto. La suma de los primeros cuatro submodelos conforma un modelo estático de riesgo de incendio. Finalmente, el modelo se vuelve multi-temporal al sumar el modelo estático con el submodelo de clima, ya que éste considera los cambios de riesgo para cada mes del año. A continuación se describen brevemente los submodelos.

### **2.2.1 Submodelo Combustible**

El combustible es una de las principales variables que determina la ocurrencia y expansión de un incendio forestal. Es uno de los tres componentes indispensables para la combustión y en su ausencia el desarrollo de un incendio es imposible. Para construir éste submodelo se utilizaron mapas de pendiente, orientación de ladera, altitud y cobertura de suelo. Este último incluye el tipo de vegetación. Para construir el submodelo, la información de los factores mencionados se reclasificó de acuerdo a índices de riesgo. De ésta manera la suma de los mapas de riesgo constituye el mapa final de riesgo de combustible. Para generar el índice de riesgo de incendio basado en la cobertura de suelo se tomaron en cuenta los resultados de el taller nacional de consulta y validación de la información dentro del marco del programa "Los incendios en México: un diagnóstico de su efecto en la diversidad biológica", organizado por la CONABIO en 1998 donde un grupo de 21 expertos discutió la susceptibilidad de diferentes tipos de vegetación a un incendio. Asimismo se utilizó información bibliográfica acerca de la densidad de árboles y biomasa por tipo de vegetación. De ésta forma, se consideró al Bosque Tropical Caducifolio como el tipo de vegetación con mayor riesgo, seguido del Bosque de Pino. Los índices de riesgo basados en los factores topográficos de pendiente, orientación de ladera y altitud se construyeron a partir de tres conceptos. El primero de ellos es que el grado de inclinación tiene una relación directa con la exposición del combustible al fuego. Por lo tanto a mayor inclinación de la pendiente mayor contacto de la flama con el combustible y mayor riesgo. El segundo, toma en cuenta el efecto ladera que se presenta en el hemisferio norte de la Tierra, dónde debido a la exposición solar, las laderas sur son más secas y calientes que las laderas norte. El material seco y caliente de dichas laderas tiene por lo tanto mayor probabilidad de incendiarse. Por ultimo se consideró la altitud pues en zonas alejadas de grandes cuerpos de agua, a medida que ésta se incrementa la precipitación aumenta y la temperatura disminuye por lo que el riesgo de incendio es menor en altitudes mayores.

### **2.2.2 Submodelo Ignición**

El ser humano es el responsable de más del 90% de incendios en México. En Michoacán la quema de pastizales y el descuido de fogatas son las principales causas. De Enero a Mayo se presenta la temporada seca, la cual coincide con las prácticas de quema agrícolas de la región. La expansión del fuego de los terrenos agrícolas al bosque suele ser un fenómeno común. La cercanía a carreteras y poblados es un factor que también puede promover la presencia de incendios. Se ha comprobado que existe un efecto de borde en la vegetación que rodea a las carreteras. En particular, el incremento de la temperatura de la superficie cercana a las carreteras con respecto a las áreas más alejadas es uno de los principales factores que pueden favorecer a los incendios. Asimismo, no es raro encontrar vegetación exótica o invasiva típica de sitios perturbados junto a caminos. Entre éstas especies frecuentemente se encuentran especies pirófilas, como algunas especies de pastos. Tomando ésta información en consideración los índices desarrollados en éste submodelo se basan en que a mayor cercanía a campos

agrícolas, pastizales, poblados y caminos, el riesgo de incendio se incrementa. La suma final de los mapas de índice de riesgo de distancia constituye, finalmente, el mapa de riesgo de ignición.

### **2.2.3 Submodelo Detección**

En la realización de éste submodelo se calculó la visibilidad que existe desde torres forestales, ciudades y carreteras. Dicho cálculo se basó en el modelo digital de elevación del área y la localización de los puntos de observación. El producto resultante fue un mapa de visibilidad. Las áreas no visibles en el mapa se clasificaron como de mayor riesgo. Las áreas visibles por otro lado tienen menor riesgo ya que los incendios pueden ser detectados y apagados con mayor rapidez.

### **2.2.4 Submodelo Respuesta**

El submodelo de respuesta considera el tiempo potencial que ocurre entre la ignición y la llegada del personal de la brigada contra incendios forestales (CONAFOR y COFOM). El cálculo del tiempo de respuesta fue simple y directo, pues, está en función de la velocidad de reacción dividida entre la distancia al incendio (cualquier punto). Para su cálculo, el submodelo consideró el recorrido dentro y fuera de las vialidades. Dado que la primera aproximación a un incendio se lleva a cabo por automóvil, los caminos y carreteras juegan un papel primordial para las brigadas anti-incendio. Por ello, en este estudio, se clasificaron los caminos dependiendo de su capacidad de carga, considerándose que, entre menor es la capacidad de carga de un camino, el tiempo de respuesta disminuye. Cuando no es posible arribar a un incendio por medio de un automóvil, la aproximación se hace a pie. Para considerar este tipo de aproximación, se utilizó un mapa de fricción calculado a partir del modelo digital de elevación e información de cobertura de suelo del área de estudio. Una vez que la fricción es calculada, se genera el mapa de respuesta. Para ello se generó un mapa de distancia desde los centros de brigada ponderado con los valores de fricción. Finalmente, dicho mapa se reclasificó en intervalos homogéneos de 3 km, considerándose que a mayor distancia entre el centro de brigada y el incendio, existe menor capacidad de respuesta.

### **2.2.5 Modelo estático de riesgo de incendio**

El modelo estático de riesgo de incendio se compone de la suma de los submodelos de combustible, ignición, detección y respuesta. Para determinar el peso que se le daría a cada submodelo se compararon tres ecuaciones. La ecuación uno se definió por la suma no ponderada de submodelos. La ecuación dos, dio mayor peso al submodelo de combustible. Finalmente, la ecuación tres dio mayor peso al combustible, y en segundo lugar a la fuente de ignición, puesto que el hombre es el causante principal de incendios en Michoacán.

### **2.2.6 Modelo multi-temporal de riesgo de incendio (Submodelo Clima)**

La probabilidad de que se produzca un incendio aumenta cuando el combustible se encuentra seco. Por lo tanto, las condiciones climáticas ideales para que se desarrolle un incendio son baja humedad y altas temperaturas. Asimismo, los vientos favorecen su propagación. Las variables consideradas para la construcción de este submodelo fueron temperatura y precipitación. De ésta forma, el submodelo de clima dará una idea indirecta acerca de la humedad del combustible muerto (hojarasca, troncos y

ramas depositados en el suelo). Sin embargo, para obtener resultados más precisos, se recomienda para estudios posteriores incluir otras variables como humedad relativa y velocidad y dirección del viento.

Este submodelo fue calculado para los doce meses del año, por lo que incluye los cambios promedio en temperatura y precipitación a lo largo del año. Para ello se utilizó información de 32 estaciones meteorológicas recolectada entre los años 1977 y 2000. Para el cálculo de riesgo de incendio climatológico se generaron mapas indicadores de riesgo de incendio para la temperatura y la precipitación utilizando una lógica simple: a mayor sequedad y temperatura en el ambiente, mayor riesgo de que se produzca un incendio. Finalmente, el submodelo Clima se calculó por mes sumando y reclasificando homogéneamente los mapas indicadores de riesgo de incendio para temperatura y precipitación con el mapa estático de riesgo de incendio.

### **2.3 Validación**

En la tercera fase se validaron los submodelos y el modelo estático utilizando el mapa de áreas quemadas del sitio de estudio. Para ello se compararon las áreas quemadas contra las áreas clasificadas como de alto, medio y bajo riesgo en los submodelos. Se consideró que entre mayor sea la coincidencia de las áreas quemadas con las áreas de alto riesgo mejor funcionamiento del modelo. Asimismo, se aplicó un análisis estadístico complementario ROC (Receiving Operating Characteristic analysis) para validar el modelo, ya que predice la ubicación de un incendio al comparar el mapa de probabilidad de ocurrencia de incendio y la presencia o ausencia de áreas quemadas.

## **3 RESULTADOS**

Los productos finales de este estudio fueron un mapa estático de riesgo de incendio y doce modelos climáticos de riesgo de incendio. El conocimiento de las áreas de riesgo permitirán hacer futuras recomendaciones para planes de prevención de incendio forestal.

El presente estudio mostró que los factores de los submodelos de Combustible e Ignición juegan un papel fundamental para determinar el riesgo de incendio. En este caso, los tipos de vegetación con mayor superficie forestal quemada fueron: Bosque de encino, matorral y bosque de pino. La distribución de áreas quemadas además mostró una tendencia a incrementarse en cierto tipo de elevación, pendiente y orientación de ladera, distribuyéndose principalmente en altitudes medias orientadas al sur y en laderas de pendiente pronunciada. Los resultados también mostraron que áreas cercanas a campos de cultivo, pastizales o caminos existe mayor superficie quemada, pero a medida que la distancia aumenta la superficie quemada disminuye. Por otro lado, el submodelo de Detección reveló que existe gran parte del área de estudio es visible desde ciudades, carreteras y torres forestales. Sin embargo, es importante considerar para la planificación forestal aquellas áreas que permanecieron como no visibles desde estos puntos. De acuerdo al submodelo de Respuesta el 36.3% del área de estudio tiene una respuesta de alta a máxima, el 42.3% de media moderada y el 5.6% de baja a mínima. El resultado global de la suma de dichos modelos en su versión estática muestra que el 91% de la superficie forestal se encuentra dentro del riesgo medio alto a alto.

### **3.1 FASE I. EXPLORATORIA**

#### **3.1.1 Factores biofísicos que afectan la incidencia y comportamiento de incendios forestales**

- **Tipo de vegetación.** El combustible es indispensable para generar un incendio. Por lo tanto, las características del tipo de vegetación tienen gran influencia en el desarrollo de incendios forestales. El tipo de vegetación predominante en el área de estudio es el bosque de pino con una superficie total de 84 250 ha, seguido por el matorral secundario (57902 ha), el bosque de encino (23665 ha), el bosque de pino-encino (23521 ha), y el bosque tropical caducifolio (1009 ha). Siendo los tipos de vegetación con mayor superficie quemada: el bosque de encino (4388 ha), el matorral secundario (4316 ha), y el bosque de pino (4185 ha). La superficie quemada entre tipos de vegetación es similar, y debe ser considerada como un signo importante de degradación forestal en esta área. Sin embargo, es importante considerar que la proporción de la superficie quemada de bosque de pino es de 4%, mientras que para el bosque de encino y el bosque tropical caducifolio asciende a 19% y 17%, respectivamente. Por lo tanto, proporcionalmente a su área el bosque de encino fue significativamente más afectada que otro tipo de vegetación ( $H = 21.84, P = 0.0002$ ).
- **Altitud.** Dependiendo de ciertas características de la vegetación tales como la composición de especies y su densidad algunos tipos de vegetación son más propensos a sufrir incendios. Por lo tanto, la distribución altitudinal de la vegetación tiene una estrecha relación con la distribución de la superficie quemada. Las áreas quemadas se encontraron principalmente entre los 2000 y 2800 m s.n.m., siendo los tipos de vegetación predominantes entre estas altitudes son el Bosque de Encino y de Pino. A mayor altitud generalmente, el fuego se extingue ya sea porque la cobertura de la vegetación disminuye o a que los cambios en temperatura y humedad que existen a altitudes mayores pueden inhibir el esparcimiento de los incendios. Por otro lado, dado que nuestro interés se centra únicamente en incendios forestales, en este análisis se excluyeron las áreas no forestales tales como pastizales y campos agrícolas, ubicados principalmente en altitudes menores a 2000 m s.n.m. No obstante, es común que los incendios provenientes de estas áreas se extiendan a elevaciones mayores debido al efecto de la pendiente y el viento en el esparcimiento del fuego.
- **Pendiente.** La presencia de áreas quemadas fue mayor en pendientes pronunciadas que en áreas con poca pendiente, con excepción de la clase de pendientes muy inclinadas, cuya área es la más pequeña e inaccesible de todas ( $H = 139.2, P = 0.0001$ ).
- **Orientación.** La distribución de la superficie quemada fue significativamente diferente entre los diferentes tipos de orientación de ladera ( $F_{(7,1671)} = 2.79, P = 0.0069$ ). De acuerdo con la prueba de Tukey, no hubo diferencias significativas entre las áreas quemadas expuestas al sur, pero sí entre las expuestas al Oeste, Noroeste y Noreste. La distribución de las áreas quemadas predominó en laderas con orientación sur, ya que al recibir más horas de sol al día, estas laderas presentan mayor sequedad y temperaturas más altas que las laderas norte.
- **Factores de ignición.** La principal causa de incendios en México son las actividades humanas. En el estado de Michoacán la quema de pastizales y de campos agrícolas son las principales actividades generadoras de incendios. Ambas actividades se llevan a cabo durante la temporada de secas que va de enero a mayo. El análisis realizado en este estudio encontró que existe una clara relación entre la distancia a pastizales y campos agrícolas y el aumento de la superficie quemada. A medida que el bosque se encuentra más cerca de campos de cultivo o pastizales, hay más fragmentos quemados y el área quemada es mayor, y a medida que se aleja, el área quemada es menor. La distancia a caminos y ciudades también ejerce un efecto. El efecto borde presente alrededor de caminos y carreteras también podría estar influenciando

la distribución del área quemada. Además, es importante considerar que los caminos proporcionan acceso al humano hacia áreas forestales o remotas. Al igual que en los casos anteriores el área quemada aumenta a medida que la distancia a caminos y ciudades disminuye. Sin embargo, cabe la pena mencionar que la distancia a asentamientos humanos tiene un efecto menor con relación a la superficie quemada.

- **Clima.** La temporada de incendios ocurre durante la primera mitad del año. Abril y mayo son los meses donde ocurren la mayor incidencia de incendios. La temperatura y la baja precipitación ocurrida en estos meses permite que el combustible vegetal se seque favoreciendo, así, a los incendios forestales. Asimismo, los incendios provocados por humanos tienen mayor influencia cuando las condiciones naturales, tales como, altas temperaturas y baja humedad son propicias para los incendios.

## **3.2 FASE II. MODELAJE**

### **3.2.1 Submodelo Combustible**

El combustible y los factores relacionados con su distribución tales como la elevación, la pendiente y la orientación de ladera tienen un gran efecto en la distribución de los incendios forestales del área de estudio. Los tipos de vegetación definen las áreas de riesgo, mientras que la topografía, en particular la orientación de ladera, intensifica el riesgo. Después de integrar todos los factores, se identificaron las áreas de máximo, alto, mediano y bajo riesgo. La clase de mediano riesgo fue la clase predominante; mientras que los riesgos máximo y bajo fueron identificados en proporciones similares. El área de bajo riesgo corresponde principalmente a áreas no arboladas, principalmente campos agrícolas, pastizales o ciudades. El riesgo mediano también lo conforman campos de agricultura y pastizales; sin embargo, se localiza rodeando vegetación natural, dado que los incendios que se inician en estos sitios por lo general se extienden a las áreas arboladas. Esta clase también incluye áreas con la vegetación natural localizada en áreas bajas como matorrales o en altitudes muy altas. Las áreas clasificadas como de alto riesgo se encuentran en cuevas escarpadas con vegetación natural, principalmente bosques de pino o encino. Por otro lado, las áreas de máximo riesgo son aquellas que cumplen todas las condiciones que favorecen los incendios forestales. Estos son pendientes escarpadas orientadas al sur y con vegetación natural como pino, encino o bosque tropical caducifolio. El submodelo de riesgo de combustible se puede observar en la figura 4-12 de la sección de resultados.

### **3.2.2 Submodelo Ignición**

El modelo de ignición está relacionado con actividades humanas como la agricultura, la ganadería, o la presencia de asentamientos humanos o caminos. En la fase exploratoria se observó una relación directa entre estas variables y los incendios forestales. Debido a esto, en este submodelo fue incluida la categoría origen de riesgo, la cual incluye las áreas donde se llevan a cabo dichas actividades humanas. Los riesgos máximo y alto fueron localizados en áreas con vegetación natural limítrofes con campos de agricultura, pastizales y carreteras. Por otro lado, el riesgo mínimo fue localizado en áreas de mayor altitud donde no hay presentes asentamientos humanos. El submodelo de riesgo de ignición se puede observar en la figura 4-13 de la sección de resultados.

### **3.2.3 Submodelo Detección**

El submodelo de detección muestra las áreas donde un incendio no puede ser detectado durante un cierto período del tiempo. Ya que el área de estudio es un área altamente poblada, gran parte de la superficie es visible desde ciudades, caminos y torres forestales. Sin embargo, todavía existen algunas áreas que permanecen como no visibles. Las áreas no detectables pertenecen principalmente a áreas remotas con altitudes más altas o a barrancos. Asimismo, algunas áreas entre montañas o lejos de caminos tampoco son visibles. Este submodelo permite identificar estas áreas lo que puede ayudar en la toma de decisiones para la localización de nuevas torres o campos forestales.

### 3.2.4 Submodelo Respuesta

El submodelo de respuesta mostró que el 54% del área de estudio puede tener una capacidad de respuesta de máxima a alta, el 42% de media a moderada y el 5% de baja a mínima. Las distribuciones de las áreas de velocidad de respuesta no son al azar debido a la presencia de 15 centros forestales en el área, de los cuales las brigadas de bomberos acuden a extinguir el incendio. Casi todos los centros forestales se encuentran localizados en la parte del sur-oeste del área. Las zonas donde hay un tiempo más largo de respuesta son en general aquellos donde la altitud es mayor. Esto significa que áreas con altitudes altas y terrenos escarpados son más inaccesibles que áreas con altitudes bajas y terrenos llanos. Una cuestión importante de este modelo es que, consideró valores de fricción en el cálculo de la capacidad de respuesta. La variedad de respuestas depende de la pendiente, el tipo y densidad de la vegetación y el tipo de caminos, ya que, las cuestas escarpadas o los tipos de vegetación muy densos podrían ser difíciles de pasar por las brigadas. El mapa del submodelo respuesta se puede encontrar en la figura 4-15 de la sección de resultados.

### 3.2.5 Modelo estático de riesgo de incendio

Para construir el modelo de riesgo estático de incendio se evaluaron tres Ecuaciones:

1. Modelo estático = Combustible + Ignición + Respuesta + Detección
2. Modelo estático = (3 × Combustible) + Ignición + Respuesta + Detección
3. Modelo estático = (3 × Combustible) + (2 × Ignición) + Respuesta + Detección

La ecuación 1 es la suma de los cuatro modelos estáticos sin ponderación alguna, la ecuación 2 da más peso al submodelo Combustible y la ecuación 3 incluye al submodelo de Ignición como el segundo factor en importancia. A pesar de que las tres Ecuaciones dan pesos diferentes para el combustible y la ignición, la distribución de cicatrices quemadas es similar en la mayor parte de categorías usando las tres ecuaciones. La diferencia principal se observa en la distribución de cicatrices quemadas en las categorías de riesgo moderado y bajo. La ecuación 3 fue elegida para calcular el modelo estático, ya que da mayor peso a dos de los factores principales para iniciar un incendio: combustible y calor (fuentes de ignición).

El modelo estático de riesgo de incendio considera a todos los factores incluidos en los submodelos de combustible, ignición, detección y respuesta. El resultado global de la suma de todos los submodelos es el Modelo de Riesgo de Incendio final, pero estático. Según este modelo el 29% del área del bosque posee riesgo de incendio de máximos a alto, el 42 % es clasificado como medio-alto a moderado y el 30 % es clasificado como bajo a mínimo riesgo. Dado que el modelo de combustible posee mayor peso en el modelo, la topografía y el tipo de cobertura juegan un papel fundamental en la distribución de las

áreas de riesgo. Las áreas con riesgo máximo y muy alto corresponden a laderas de orientación sur con bosque de pino, pino-encino y encino. Por otra parte el efecto de la fuente de ignición se refleja en un claro aumento del riesgo en áreas de vegetación natural limítrofes con caminos, campos de cultivo y pastizales. En cuanto a las áreas del riesgo medio, su distribución es más heterogénea en los tipos de vegetación presentes en altitudes medias. El efecto de los submodelos de respuesta y detección no es tan evidente en el mapa final del riesgo de incendio del modelo estático, ya que ambos ocurren una vez que el fuego ha comenzado.

### **3.2.6 Modelo multi-temporal de riesgo de incendio (Submodelo Clima)**

El modelo de riesgo meteorológico se llevó a cabo para los 12 meses del año. El objetivo de este modelo fue comparar las diferencias entre la distribución de las áreas de riesgo a lo largo del año. Durante la temporada seca, se observó que las áreas clasificadas como de máximo, muy alto y alto riesgo aumentaron con respecto a los meses lluviosos. Las diferencias más contrastantes se observaron entre abril, el mes más cálido y seco, y agosto, el mes más húmedo y frío. Sin embargo, es importante considerar que el uso de valores promedio mensuales de temperatura y precipitación impide que el modelo prediga como cambiará el riesgo de incendio de un día a otro. Además el submodelo no comprende variaciones inter-anales, por lo que fenómenos climáticos relacionados con incendios forestales como “El Niño” no son considerados. No obstante, el modelo sí ayuda a identificar las áreas de mayor riesgo, principalmente durante la temporada de secas, lo cual podría permitir la elaboración de medidas de prevención. Además el modelo se puede modificar fácilmente si se cambian los parámetros climáticos.

### **3.3 FASE III. VALIDACIÓN**

La validación del modelo de riesgo de incendio forestal se llevó a cabo cruzando el mapa de áreas quemadas con los mapas de los submodelos y el modelo de riesgo de incendio final. El modelo estático tuvo una alta coincidencia de las áreas de riesgo alto y la superficie quemada o escamas de incendio, ya que el 92 % de la superficie quemada fue localizada principalmente en las categorías de máximo a medio-alto riesgo. Por lo tanto, los esfuerzos en el manejo de incendios forestales, deben dirigirse principalmente a las áreas de riesgo muy alto a medio alto. Dado que este modelo incluye la información de los submodelos de Combustible, Ignición, Detección y Respuesta y constituye la base para el submodelo Clima, se aplicó un análisis ROC (Receiver Operation Characteristic) como prueba adicional para la validación. Dicho análisis reveló que el modelo estático fue muy bueno al clasificar las categorías de riesgo de incendio ( $ROC = 0.8$ ). Por otro lado, en el caso del submodelo Clima tuvo un porcentaje alto de coincidencia de cicatrices de incendio en las categorías de riesgo alto para los meses de la temporada seca, mientras que para los meses de la temporada lluviosa el riesgo disminuye para las mismas áreas. Para abril el 98% de las cicatrices de incendio se localizó en las categorías de riesgo alto, mientras que para agosto solo fue del 25%. Finalmente cabe la pena mencionar que en general la exactitud del modelo fue alta ya que casi todas las cicatrices de incendio se localizaron en la clase de riesgo alto.

## **4 CONCLUSIONES**

El objetivo general de este estudio se cumplió, ya que se elaboró un mapa de riesgo forestal para una zona con frecuentes incendios en Michoacán. El modelo identificó apropiadamente las áreas de alto,

medio y bajo riesgo de incendio forestal. El modelo estático mostró que 29% de la superficie forestal tiene un riesgo de máximo a muy alto, el 42% de medio alto a moderado y el 30% de bajo a mínimo.

Para desarrollar el modelo de riesgo se cumplieron los cuatro objetivos específicos planteados: 1) Detectar y mapear las áreas quemadas usando una imagen ASTER, 2) Analizar los principales factores relacionados con incendios forestales del área, 3) Desarrollar un modelo de riesgo de incendio forestal que identifique las áreas con mayor probabilidad de incendio, y 4) Validar el modelo de riesgo de incendio forestal. A continuación se presentan las conclusiones específicas.

La utilización de la imagen ASTER permitió mapear exitosamente las áreas quemadas utilizando una combinación de bandas 3, 2, 1. El área afectada por incendios forestales fue de 15,220 ha de un total de 339,330 ha. En base a este mapa los factores relacionados con incendios forestales tales como pendiente y tipo de vegetación fueron evaluados. Como resultado, se encontró que existe una clara relación entre la presencia de áreas quemadas y la distancia a campos de cultivo, pastizales, caminos y ciudades. Asimismo, la topografía tiene un efecto importante ya que la distribución de las áreas quemadas es predominante en áreas con pendientes pronunciadas y laderas orientadas al sur. Finalmente, los tipos de vegetación con mayor superficie quemada fueron los bosques de pino y encino.

Los submodelos de combustible, ignición, detección y respuesta constituyen el modelo estático. Los componentes tanto del modelo de combustible como el de detección fueron fundamentales para el correcto desarrollo del modelo de riesgo de incendio. Por otro lado, el mapa de detección mostró que aunque la mayor parte del área de estudio es visible, aún existen áreas en donde los incendios no son perceptibles desde su origen. De acuerdo con el submodelo de respuesta el 54% del área de estudio tiene una capacidad de respuesta de máxima a alta. Dicha capacidad se encuentra en función de la pendiente, la altitud, el tipo de vegetación y el tipo de camino. Por ejemplo, pendientes pronunciadas o con tipos de vegetación densos como el bosque tropical caducifolio oponen más resistencia al paso de brigadas que zonas planas con pastizal. Finalmente, los modelos de riesgo climático mostraron diferencias en la distribución del riesgo entre los meses más calidos y secos y los meses pertenecientes a la temporada de lluvias. Abril resulto ser el mes con mayor riesgo del año, mientras agosto es el mes con menor riesgo. Dichos resultados coinciden con las estadísticas de incendios oficiales (COFOM, CONAFOR) que muestran dicha tendencia de incendios forestales a lo largo del año.

Finalmente, la validación del modelo estático de riesgo fue satisfactoria para el área de estudio, dado que la mayor parte de los modelos presentó más del 92% de la superficie quemada en las áreas clasificadas como de muy alto a alto riesgo. Por lo tanto, los resultados de éste estudio son apropiados para elaborar estrategias de prevención de incendios en el área de estudio. En resumen, el modelaje por medio de sistemas de información geográficas aplicado en este estudio permitió la elaboración de un modelo confiable de riesgo de incendios forestales. Asimismo, la simplicidad del modelo permite incorporar nuevas variables o realizar ajustes con el fin de mejorar los resultados ya obtenidos. En base a las observaciones hechas en este estudio, a continuación se citan las recomendaciones propuestas para futuros estudios en el tema:

- Se recomienda complementar la interpretación visual de las áreas quemadas con otra técnica como el análisis de índices de vegetación o valores de temperatura superficial.



- Se recomienda ampliamente incluir datos que proporcionen información del estado de humedad del combustible, dirección y velocidad del viento.
- Dado que los incendios se incrementan debido a fenómenos meteorológicos como “El niño”, se recomienda alimentar al modelo con información meteorológica actualizada de manera constante.
- La inclusión de información adicional relacionada con densidad de vegetación o biomasa puede mejorar los resultados encontrados en este estudio.

Algunas de las ventajas de utilizar el método aplicado en este estudio son que 1) El modelo se puede reproducir fácilmente para otras áreas, dado su sencillo manejo y operación y 2) El método aplicado es poco costoso dado que la mayor parte de los procesos se llevan a cabo en el software Ilwis, cuya licencia es gratuita, lo que permite que su aplicación se lleve a cabo fácilmente en otras áreas del país.

## Abstract

---

The incidence of fires in size, frequency and intensity has increased significantly around the world. Mexico, a mega diverse country, has recurring forest fires, especially during the El Niño years. However, government efforts to the prevention of fires are still insufficient to reduce fire frequency and intensity. Moreover, fire risk maps at medium scale are still lacking for most of the country. Mexico needs to develop, fire prevention strategies with high efficiency in order to avoid the loss of natural resources. As any other natural disaster, fires have always influenced ecosystems provoking important abiotic and biotic changes. However, not all the ecosystems are adapted to the increasing frequency and size of forest fires. Fires cause the loss of local biodiversity and grave socio-economical damage. In Mexico, Michoacan state is among the first states with high fire frequency. Human activities such as grassland burning or campfires are the main cause. The general objective of this study is to model forest fire risk for a critical zone in Michoacan state. In order to do this, the method was divided in three phases: exploratory, modelling and validation. This study integrates biophysical and human variables into a fire risk model. There are four main factors that modify the fire risk model: 1) fuel, 2) physical environment, 3) causal factors and 4) prevention and suppression. Out of these factors, fuel was considered the most important since is indispensable for fire ignition and spreading of fires. In the first phase, these effecting factors were analyzed statistically. Likewise, in this phase, an ASTER image was used for visual interpretation to generate a burnt area map and to improve the vegetation type map. In the second phase, to detect the high, medium and low risk areas, five sub-models were developed: Fuel, Ignition, Detection, Response and Weather. These sub-models were constructed using logical indices based on a literature review and the opinion of the expert. Finally, in the third phase, the fire model was validated with a burn area map of the study site. The final outputs were a static fire risk model and twelve weather monthly risk models. The knowledge of the fire risk areas allow us to recommend the development of fire prevention plans.

The study revealed that factors included in the fuel and ignition sub-models play an important role to determine the fire risk. The vegetation types with more burnt surface were: Oak forest, Scrubland and Pine forest. The distribution of the burnt areas also shows a tendency on elevation, aspect and slope classes. Burnt areas were predominantly over medium altitudes, oriented to south and on steep slopes. Results also showed that in the proximity of crop fields, grasslands and road there is more burnt surface, but as this distance increases the burnt surface decreases. On the other hand, the detection sub-model revealed that a high percent of the study area is visible from cities, roads and forest towers. For fire risk management plans however, it is worth to consider the non visible areas. According to the Response sub-model 54% of the study area has a high to maximum response, 42% shows a medium to moderate response and 5% may have a low to minimum response. The results of the sum of these sub-models in its static version show that 92% of the forest's surface is in the medium high to high risk categories.

**Key words:** Forest fire, Fire risk, Fuel, Ignition, Weather, Detection, Response, México, Michoacán