

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES**

**SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO**



**Elaboración de un Modelo Espacial de Peligro de Incendios  
Forestales**

**Tesis de Maestría  
Presentada como requisito parcial para obtener el grado de  
Maestría en Ciencias Forestales**

**por**

**Carlos Alfonso Muñoz Robles**

TM

Z599

FCF

2001

M8



1020145506

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**  
**FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES**

**SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO**



**Elaboración de un Modelo Espacial de Peligro de Incendios  
Forestales**

**Tesis de Maestría**

**Presentada como requisito parcial para obtener el grado de**

**Maestría en Ciencias Forestales**

**por**

**Ing. Carlos Alfonso Muñoz Robles**

0149-61060

M  
5991  
CF  
2001  
48



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**  
**FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES**

**Elaboración de un Modelo Espacial de Peligro de Incendios  
Forestales**

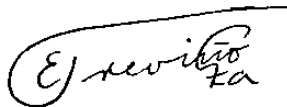
**TESIS DE MAESTRÍA**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN CIENCIAS FORESTALES**

**PRESENTA:**

**Ing. Carlos Alfonso Muñoz Robles**

**COMITÉ DE TESIS**




---

Dr. Eduardo J. Treviño Garza  
Director



---

Dr. Javier Jiménez Pérez  
Asesor



---

Dr. Oscar A. Aguirre Calderón  
Asesor

## CONTENIDO

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>2. HIPÓTESIS</b> .....	<b>3</b>
<b>3. OBJETIVOS</b> .....	<b>4</b>
<b>4. ANTECEDENTES</b> .....	<b>5</b>
4.1. GENERALIDADES ACERCA DE LOS INCENDIOS FORESTALES .....	5
4.1.1. <i>Causas de los incendios Forestales</i> .....	5
4.1.2. <i>Daños ocasionados por el fuego</i> .....	6
4.2. ÍNDICES DE PELIGRO DE INCENDIOS FORESTALES.....	7
4.2.1. <i>Conceptos básicos</i> .....	7
4.2.2. <i>Índices de Peligro desarrollados en el ámbito mundial</i> .....	8
4.2.3. <i>Índices de Peligro desarrollados en México</i> .....	10
4.2.4. <i>Utilización de Sistemas de Información Geográfica en la estimación de los Índices de Peligro</i> .....	11
4.3. EVALUACIÓN DEL PELIGRO DE INCENDIOS FORESTALES.....	13
4.3.1. <i>La naturaleza del fuego</i> .....	13
4.3.2. <i>El complejo de combustibles forestales</i> .....	14
4.3.2.1. <i>Tipología de los combustibles forestales</i> .....	15
4.3.2.2. <i>Evaluación de los combustibles forestales</i> .....	17
4.3.3. <i>Variables meteorológicas</i> .....	19
4.3.3.1. <i>Estimación de datos meteorológicos faltantes</i> .....	20
4.3.3.2. <i>Métodos de interpolación espacial</i> .....	21
4.3.3.2.1. <i>Métodos locales de interpolación espacial</i> .....	22
4.3.3.2.2. <i>Métodos de interpolación a través de funciones de regresión</i> .....	25
4.3.4. <i>Variables topográficas</i> .....	28
4.3.4.1. <i>Construcción de Modelos Digitales del Terreno</i> .....	28
4.3.4.1.1. <i>Construcción de Modelos Digitales Derivados</i> .....	29
4.3.5. <i>Variables socioeconómicas y culturales</i> .....	30
4.3.6. <i>Integración de variables para la estimación de Índices de Peligro de Incendios Forestales</i> .....	31
<b>5. MATERIALES Y METODOLOGÍA</b> .....	<b>36</b>
5.1. UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	36
5.2. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO .....	37
5.2.1. <i>Fisiografía</i> .....	37
5.2.2. <i>Topografía</i> .....	37
5.2.3. <i>Clima</i> .....	37
5.2.4. <i>Suelos</i> .....	38
5.2.4. <i>Vegetación</i> .....	38
5.2.5. <i>Aprovechamiento forestal</i> .....	38

5.3. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN .....	39
5.3.1. Actualización cartográfica .....	39
5.3.2. Cuantificación de combustibles forestales .....	42
5.3.2.1. Análisis digital de la imagen Landsat TM.....	46
5.3.3. Análisis de variables meteorológicas .....	47
5.3.3.1. Selección de estaciones climatológicas.....	47
5.3.3.2. Construcción de Modelos de Regresión lineal.....	49
5.3.4. Generación de Modelos Digitales del Terreno.....	51
5.3.5. Evaluación de variables socioeconómicas .....	52
5.3.6. Evaluación de los criterios seleccionados.....	53
5.3.6.1. Estandarización de las dimensiones de los criterios.....	53
5.3.6.2. Asignación de valores de importancia a los criterios.....	56
<b>6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>62</b>
6.1. ACTUALIZACIÓN CARTOGRÁFICA.....	62
6.2. CARACTERIZACIÓN DEL COMPLEJO DE COMBUSTIBLES FORESTALES MUERTOS .....	63
6.2.1. <i>Relación entre la carga de combustibles forestales y los valores de reflectividad</i> <i>obtenidos de la imagen TM.....</i>	66
6.3. VARIABLES METEOROLÓGICAS .....	67
6.4. VARIABLES TOPOGRÁFICAS .....	74
6.4.1. <i>Orientación de pendientes .....</i>	74
6.5. VARIABLES SOCIOECONÓMICAS .....	75
6.5.2.1. Áreas de aprovechamiento forestal .....	75
6.5.2.2. Vías de acceso .....	76
6.5.2.3. Poblaciones.....	76
6.6 EVALUACIÓN DEL PELIGRO DE INCENDIOS FORESTALES .....	77
<b>7. CONCLUSIONES .....</b>	<b>85</b>
<b>8. LITERATURA CITADA.....</b>	<b>87</b>



## LISTA DE CUADROS Y FIGURAS

Figura 1. Superficie afectada por incendios forestales por tipo de vegetación .....	7
Figura 2. Clasificación de los combustibles forestales.....	16
Figura 3. Ubicación del área de estudio .....	36
Figura 4. Fotografías aéreas correspondientes a las líneas de vuelo empleadas antes de ser referenciadas geográficamente .....	40
Figura 5. Distribución de puntos de control en una fotografía aérea .....	41
Figura 6. Línea de muestreo para la evaluación de combustibles forestales muertos .....	43
Figura 7. Esquema del Modelo Espacial de Peligro de Incendios Forestales propuesto.....	56
Cuadro 1. Superficie de las áreas arboladas bajo estudio en el Ejido Corona del Rosal.....	62
Cuadro 2. Carga de combustibles forestales y valores estadísticos descriptores .....	64
Cuadro 3. Valores del coeficiente de correlación entre los tipos de combustibles forestales muertos y las bandas 4 y 5 de la imagen Landsat TM.....	67
Cuadro 4. Resumen del modelo de regresión lineal simple siendo la temperatura media máxima mensual la variable dependiente y la altitud sobre el nivel del mar la variable independiente .....	69
Figura 8. Superficies obtenidas a partir del mapa de temperatura media máxima mensual.....	69
Cuadro 5. Resumen del modelo de regresión lineal múltiple siendo la precipitación total promedio mensual la variable dependiente y la altitud, longitud y latitud las variables independientes .....	71
Figura 9. Superficies obtenidas a partir del mapa de precipitación total media mensual.....	72

Figura 10. Distribución temporal de la temperatura media y la precipitación total media mensual .....	73
Cuadro 6. Superficies por clase de orientación de pendientes .....	74
Cuadro 7. Superficies bajo aprovechamiento en áreas arboladas del Ejido Corona del Rosal .	75
Cuadro 8. Longitud de vías de acceso en el Ejido Corona del Rosal .....	76
Cuadro 9. Valores de importancia para los atributos del Índice de Combustibles Forestales...	77
Cuadro 10. Valores del Índice de Combustibles por tipo de vegetación.....	78
Cuadro 11. Valores de importancia para los atributos del Índice Meteorológico .....	79
Cuadro 12. Valores máximos del Índice Meteorológico a nivel mensual .....	80
Cuadro 13. Valores de importancia para los atributos del Índice de Causa .....	81
Cuadro 15. Superficies por grado de Peligro de Incendios a nivel mensual .....	83
Figura 11. Distribución temporal de los valores promedio mensuales del IPIF .....	84

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Causas directas de los incendios forestales en México en 1998 .....	5
Tabla 2. Estaciones climatológicas empleadas.....	48
Tabla 3. Valores estandarizados para cada clase de orientación de pendientes .....	55
Tabla 4. Matriz de comparación de criterios .....	57
Tabla 5. Escala de valores relativos de importancia.....	57
Tabla 6. Puntuaciones de los atributos del Índice de Combustibles Forestales .....	58
Tabla 7. Puntuaciones de los atributos del Índice Meteorológico.....	58
Tabla 8. Puntuaciones de los atributos del Índice de Causa.....	59
Tabla 9. Orden de los criterios para la generación del Índice de Peligro de Incendios.....	60
Tabla 10. Clasificación del Peligro de Incendios Forestales.....	61

## RESUMEN

La presente investigación tuvo como propósito principal el detectar áreas susceptibles de incendios en el Ejido Corona del Rosal, Galeana, Nuevo León.

Se eligió la técnica de Evaluación Multicriterio para integrar las variables que determinan el grado de Peligro de Incendios, obteniéndose Índices que pudieron ser cartografiados y de esta manera conocer la localización de áreas vulnerables a este tipo de siniestros.

Los componentes del Índice de Peligro de Incendios fueron el Índice de Combustibles, generado a partir de la evaluación de la carga de combustibles forestales muertos terrestres y superficiales; el Índice Meteorológico, definido por las variables meteorológicas temperatura media máxima y precipitación total. El componente restante estuvo representado por factores socioeconómicos, evaluados de forma indirecta a través de rasgos geográficos que dieron lugar al Índice de Causa.

La resolución temporal del Modelo de Peligro de Incendios fue a nivel mensual. Se obtuvieron un total de 12 mapas que representan el grado de Peligro, uno para cada mes del año y en donde fueron integrados los tres índices antes mencionados.

Las áreas con mayor grado de Peligro correspondieron a aquellas en donde la cantidad de humedad es menor y se llevan a cabo prácticas de aprovechamiento forestal.

## 1. INTRODUCCIÓN

Por sus condiciones climáticas y fisiográficas, México es particularmente vulnerable a incendios forestales durante el periodo de estiaje. Debido a esto, año con año ocurre un gran número de incendios especialmente en zonas sometidas a periodos prolongados de sequía.

De acuerdo con estadísticas de la Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, de 1980 a 1997 han ocurrido en promedio anualmente en México 6,837 incendios forestales, que han afectado una superficie de 223,114 ha.

Por otra parte, en el periodo de 1980 a 1998, en el estado de Nuevo León se registraron 619 incendios, afectando una superficie de 103,280 ha, siendo en los años de 1989 y 1998 cuando se presentó una mayor superficie afectada debido a las condiciones climáticas y meteorológicas que fueron particularmente extremas en esos dos años (SEMARNAP N.L., 1999). Los municipios con mayor incidencia de incendios forestales son General Zaragoza y Galeana, localizados en la fracción de la Sierra Madre Oriental dentro del estado. Esta región está considerada como una de las áreas con mayor peligro de incendios en el estado.

Cabe señalar que si bien Nuevo León no es una de las entidades en donde se presentan un número considerable de incendios al año, si se encuentra dentro de los diez estados con mayor superficie afectada.

La alta incidencia de incendios forestales trae como consecuencia el deterioro de los sistemas naturales, ya que, de acuerdo con Sánchez (1989), los incendios en nuestro país son conceptuados como el factor de perturbación que más daño ha causado a los diferentes ecosistemas forestales que evidentemente son la resultante de la interacción de diversos factores, principalmente de carácter socioeconómico e incluso político y cultural que, influidos fuertemente por los topográficos y climáticos, los hacen difíciles de minimizar.

Con la finalidad de optimizar las acciones de combate, reducir los daños por el fuego y contar con una mejor eficiencia en el uso de los recursos humanos, materiales y financieros, es imperativo contar con estrategias de prevención y control de incendios. Para lograr lo anterior, es necesario conocer el Índice de Peligro de Incendios, que de acuerdo con Vélez (1968), citado por Magaña (1985), es un número que refleja anticipadamente la posibilidad de que se produzca un incendio, así como la facilidad de que se propague, de acuerdo con las condiciones atmosféricas del día o de una serie de días.

Dado que un incendio forestal es un fenómeno que se manifiesta espacial y temporalmente, y que, para que un incendio ocurra, es necesario que se combinen varios factores constantes y variables que se manifiestan de igual forma en el ambiente, es posible estimar con base en esta información el grado de peligro de incendios al que está sujeta un área dada.

De esta forma, al analizar una serie de criterios como la cantidad de combustibles forestales, parámetros climáticos tales como la temperatura y la humedad relativa, rasgos topográficos, así como la influencia de las actividades humanas, y asignarles un valor o importancia sobre el Peligro, se pueden obtener indicadores de peligro de incendios, de gran utilidad para identificar áreas susceptibles de incendios forestales.

## 2. HIPÓTESIS

Existen diversos factores de carácter biótico y abiótico que influyen en el grado de peligro de incendios en áreas forestales. A partir de lo anterior, se plantean para los fines de esta investigación las siguientes hipótesis:

- Las condiciones meteorológicas y el complejo de combustibles influyen directamente en el grado de peligro de incendios forestales
- Las áreas con mayor peligro de incendios son aquellas sujetas al aprovechamiento forestal.

Con base en la literatura consultada, la carga de combustibles es el parámetro de mayor importancia en un modelo de combustible, por lo que se plantea que:

- Los índices de vegetación derivados de información obtenida a través de imágenes de satélite tienen una fuerte correlación con la cantidad de material combustible en el terreno.

### 3. OBJETIVOS

#### 3.1. General

*3.1.1. Clasificar el grado de peligro de incendios forestales en las áreas arboladas del Ejido Corona del Rosal, Municipio de Galeana, Nuevo León*

#### 3.2. Particulares

*3.2.1. Generar modelos de combustibles forestales en función de la ocupación y uso del suelo*

*3.2.1. Crear un Sistema de Información Geográfica para la zona*

*3.2.1. Integrar variables meteorológicas, topográficas, modelos de combustibles y rasgos socioeconómicas en el Sistema de Información Geográfica para estimar Índices de Peligro de Incendios Forestales*



## 4. ANTECEDENTES

### 4.1. GENERALIDADES ACERCA DE LOS INCENDIOS FORESTALES

#### 4.1.1. Causas de los incendios Forestales

De acuerdo con Sarre y Goldammer (1996), la mayoría de los incendios forestales se inician con fines específicos, tales como el desmonte de la tierra y su preparación para la agricultura y el pastoreo de ganado así como para aumentar el rendimiento de algunos productos forestales.

Cedeño (1999), menciona que la principal causa de los incendios en el territorio de México se debe al uso del fuego en actividades agropecuarias. En la tabla 1 se muestran las causas directas y su aportación porcentual al total de los incendios registrados en 1998.

Tabla 1. Causas directas de los incendios forestales en México en 1998

Causa	Ocurrencia (%)
Actividades agropecuarias	54
Intencional	16
Fumadores	10
Fogatas	9
Otras causas (cultivos ilícitos, rayos, trenes, líneas eléctricas)	6
Actividades silvícolas	2
Derechos de vía	2
Actividades productivas	1

Como puede observarse, el 98 % de los incendios se atribuyeron a causas humanas, sin embargo, en ese año en particular, las condiciones climáticas favorecieron la incidencia de incendios forestales. No obstante de que para cada temporada de incendios estos porcentajes de causas directas suelen cambiar, la estructura de las mismas sigue siendo muy similar a la presentada en el cuadro anterior.

Paré (1999), agrupa las causas estructurales de los incendios en dos grandes bloques: uno inherente a aspectos ecotecnológicos y a los sistemas de producción mismos, incluidas las dimensiones socioculturales, y otro relacionado con el contexto macroeconómico y político. Dentro del primer grupo destaca los cambios de uso del suelo, factores socioculturales y agrarios, falta de integración de los sistemas productivos, condiciones climatológicas y el acceso abierto a las tierras de uso común. En el segundo grupo incluye las políticas agropecuarias, la pobreza, política agraria, falta de integración entre la política forestal y la política agropecuaria y los impactos de las políticas de ajuste estructural: la apertura de mercados, costos de oportunidad y narcotráfico.

#### **4.1.2. Daños ocasionados por el fuego**

Se estima que hasta un 48% de la deforestación en los bosques templados y un 13% de aquella que afecta a las selvas se deben a incendios forestales (SEMARNAT, 2001), (figura 1).

Los incendios ocasionan diversos efectos en los ecosistemas. El fuego es un factor ambiental que se presenta de forma natural, por lo que tiene gran influencia en la formación y estructura de los ecosistemas, de tal forma que también significa que el fuego tiene un papel en el mantenimiento de los mismos. Diversas especies dependen del fuego para continuar existiendo. Sin embargo, existen efectos negativos extremos ocasionados por los incendios provocados, es decir, sobre los que el hombre tiene una gran influencia; generalmente son de gran magnitud y recurrencia, además de ser considerados como incendios perjudiciales.

Proporción de superficie afectada por incendios forestales por tipo de condición de condición  
(Periodo enero-mayo de 1998)

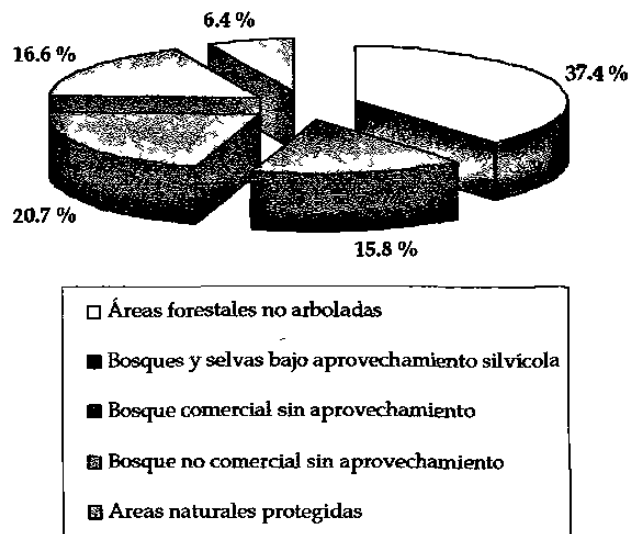


Figura 1. Superficie afectada por incendios forestales por tipo de vegetación

## 4.2. ÍNDICES DE PELIGRO DE INCENDIOS FORESTALES

### 4.2.1. Conceptos básicos

Los estudios para el establecimiento de los Índices de Peligro de Incendio (IPI) tuvieron inicio en algunos países del mundo a comienzos del siglo pasado.

Peligro de Incendio, de acuerdo con Cheney (1968), citado por Magaña (1985), es un término general que expresa el resultado de la acción de factores constantes y variables, mismos que afectan las probabilidades de que un incendio empiece, se propague y produzca daños, así como la dificultad de controlarlo.

Por otra parte, el Índice de Peligro de Incendios, es un número que refleja anticipadamente la posibilidad de que se produzca un incendio, así como la facilidad de que se propague, de acuerdo con las condiciones atmosféricas del día o de una serie de días (Vélez, 1968, citado por Magaña, 1985).

En teoría, un IPI infalible sería el que pudiese predecir la causa, el lugar y momento en que un siniestro se va a iniciar, lo cual es muy difícil, por la infinidad de variables y el carácter aleatorio de las mismas que inciden en el peligro de incendio (Rodríguez, 1996).

#### 4.2.2. Índices de Peligro desarrollados en el ámbito mundial

Shank (1935) citado por Magaña (1985), fue uno de los primeros en desarrollar un método para medir el peligro de incendio. Su método se basa en la acumulación de información sobre la humedad relativa, identificando así los periodos de peligro de manera general, pero no era sensitivo a los cambios que ocurrían día a día.

Con el paso del tiempo, se fueron perfeccionando los métodos, y aún hoy en día existen, en el ámbito mundial varios intentos para tratar de determinar las áreas con mayor peligro de incendios forestales; destacan, por el número de investigaciones y modelos desarrollados, los países de Canadá, con el sistema Canadian Wildland Fire Information System, ampliamente aceptado y utilizado en el mundo y mismo que incluye subsistemas como el *Canadian Forest Fire Weather Index System* y el *Canadian Forest Fire Danger Index*; Australia, con el sistema *Forest Fire Danger Index* y Estados Unidos de América con el sistema *National Fire Danger Rating System*, desarrollado por el Servicio Forestal del citado país.

Cada uno de los modelos generados en estos tres países cuenta con una serie de módulos o subíndices, que aportan una considerable resolución temporal y espacial, además de predecir el comportamiento del fuego en función de parámetros topográficos como pendiente y orientación de la misma, información detallada sobre cantidad y humedad de los combustibles forestales ligeros. Destaca la actualización de la información meteorológica en tiempo real, así como la generación de índices de sequía derivados de dicha información y obtenidos, también en tiempo real.

Lo anterior permite tomar medidas preventivas, de control y combate de incendios forestales ya que es factible predecir la dificultad con la que se controlará un incendio y la velocidad de propagación potencial que puede alcanzar el fuego.

El Sistema canadiense de Índice Meteorológico de Peligro (IMP) proporciona rangos numéricos del potencial relativo del incendio para un combustible forestal estándar sobre terreno plano, basado en observaciones diarias del tiempo al mediodía (Natural Resources Canada, 1999). De esta forma, los índices utilizados para el cálculo del IMP son: Índice de Humedad del Combustible Ligero, Índice de Humedad del Humus, Índice de Sequía, Índice de Propagación e Índice de Consumo de Combustible.

Utilizando los IMP, material combustible y condiciones topográficas como variables, se pueden derivar predicciones de carácter cuantitativo referentes a la propagación de incendios, su intensidad y la cantidad de combustible que se consumirá.

Stolyarchuk (1979), desarrolló un Índice de Peligro basado en datos meteorológicos, con lo cual calculó un Índice de Peligro diario, mensual y estacional además de estimar un coeficiente de anomalía de lluvia. En función de estos resultados fue posible dirigir las acciones de control y combate en el este de Siberia.

Mathur *et al.* (1984), desarrollaron un Índice de Peligro basado en temperaturas promedio máximas, precipitación, humedad relativa y velocidad del viento para el área de West Dehra, India.

Marcozzi *et al.* (1994), utilizaron datos climáticos de un periodo de 10 años y la frecuencia de incendios ocurridos en la región de Ticino Canton, Suiza, y crearon un Índice Provisional de Peligro de Incendios basado en la reducción de la evapotranspiración durante la época de incendios. Derivaron, a través de este análisis curvas de probabilidad de incendios para las estaciones de verano e invierno.

Mandallaz *et al.* (1997), presentaron una metodología para la predicción de incendios forestales en algunas zonas de Francia, Italia, Portugal y Suiza, a través de modelos probabilísticos del tipo Poisson. Dichos autores demostraron que la incorporación de estos modelos a un Índice de Peligro lleva siempre a resultados más confiables que los obtenidos mediante un Índice de Peligro simple.

### 4.2.3. Índices de Peligro desarrollados en México

En México, pocos han sido los logros que se han obtenido debido a la casi inexistente investigación realizada en este contexto.

De acuerdo con Sánchez (1989), a pesar de que el problema de los incendios en México durante muchos años ha incidido sobre los bosques y selvas con las consecuentes pérdidas en bienes y servicios, poca o casi nula atención se le ha prestado a la investigación en esta disciplina, manifestándose deficiencias en los distintos aspectos de la prevención y combate.

Las necesidades prioritarias de investigación, continúa Sánchez, son las relacionadas con los métodos de control de combustibles, el desarrollo de sistemas de índices de riesgo de incendios, el comportamiento del fuego, la evaluación económica de los incendios y el uso y manejo de equipos y herramientas.

De acuerdo con Capó (1999), se reconoce a Toledo como uno de los pioneros en la definición de los índices de riesgo en México. Los trabajos de Magaña en 1983 y Marín en 1984 contribuyeron al desarrollo de dichos índices.

El primer trabajo (Magaña, 1983), citado por Magaña (1985), determina un índice de inflamabilidad, es decir, un índice relacionado con la ocurrencia de incendios forestales en el área de Tlahuapan, estado de Puebla. Basándose en condiciones climáticas, identifica los factores meteorológicos que ejercen mayor influencia en la presencia de incendios, y sobre la base de estos factores desarrolla, por medio de regresiones, modelos matemáticos de predicción.

Melgar (1986), citado por Rodríguez, 1996, determinó riesgos de incendio en la meseta tarasca, en el estado de Michoacán, con base en variables como pendiente, profundidad de la capa de combustibles, número de meses de sequía, duración del incendio, superficie afectada y causa, entre otras.

Zapata (1991), desarrolló lo que denominó un Índice de Peligro Potencial de Incendios, con base en la carga de combustibles forestales muertos para la Unidad de Administración Forestal Topia, Durango.

Por su parte, Santillán (1993), propone un Índice de Peligro fundamentado principalmente en la información dasonómica y del sitio, que se obtiene de los inventarios del SICODESI (Sistema de Conservación y Desarrollo Silvícola). Tal Índice parte de cuatro valores, denominados grados: a) de combustibilidad; b) topográfico; c) de causalidad y, d) meteorológico. Entre estos valores se determina el grado de peligro de incendio, mediante el uso de intervalos de valores en cada rubro, y mediante la suma de los valores consignados se obtiene finalmente el grado de peligro (Rodríguez, 1996).

Actualmente se ha concluido el Proyecto "Índices de peligro y modelos de simulación en el Sistema de Información Geográfica para la prevención y control de incendios forestales", propuesto por la Universidad de Baja California a nivel estatal.

Existe, desde enero de 1999, producto de un Acuerdo sobre cooperación en materia forestal entre la antes SEMARNAP y el Departamento de Recursos Naturales y el Servicio Forestal Canadiense firmado el 28 de marzo de 1996, la generación de reportes sobre el Sistema de Información de los Incendios Forestales y Pronósticos climatológicos a largo plazo a escala nacional y utilizando como base el *Canadian Wildland Fire Information System*. Dichos reportes los llevan a cabo la Dirección General Forestal en colaboración con el Servicio Meteorológico Nacional, la Universidad de Colima y la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO).

#### **4.2.4. Utilización de Sistemas de Información Geográfica en la estimación de los Índices de Peligro**

Un Sistema de Información Geográfica no puede evitar que un incendio ocurra, sin embargo, es una herramienta muy útil para identificar y definir áreas susceptibles de incendios en forma anticipada.

De acuerdo con Burrough (1991), citado por Palacio (1992), los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son sistemas computarizados que consisten en un conjunto de herramientas diseñado para la captura, el almacenamiento y análisis de información acerca de atributos en donde la localización y relaciones espaciales juegan un papel principal.

Star y Estes (1990), comentan que, básicamente, los científicos, manejadores de recursos naturales que hacen uso de información geográfica trabajan con distintos procesos. Observan y miden parámetros ambientales, también desarrollan mapas que representan características del terreno, además monitorean cambios en el ambiente en el espacio y en el tiempo y por último, modelan alternativas de acciones y procesos que operarán en el ambiente.

A través de un SIG, se hace posible la creación de "escenarios" de eventos georreferenciados, partiendo del concepto de Palacio (1992), en el que define como "escenario" a un modelo construido a partir de condiciones o enunciados derivados de la evaluación de la información, tanto espacial como no espacial, contenida en la base de datos de un SIG. La construcción de "escenarios" tiene como objetivo principal la predicción sobre el comportamiento de un fenómeno, mismo que puede ser representado en el espacio; es decir, por medios cartográficos.

La utilidad de la tecnología SIG reside en el hecho de que varios "escenarios" pueden ser visualizados en el monitor de una computadora; cambiando en cada "escenario" una variable para determinar el impacto que ese cambio tendría en el terreno.

De acuerdo con Salazar y Nilsson (1989), un SIG permite al usuario almacenar cantidades considerables de datos, permitiendo manipularlos y analizarlos para proveer de información que es vital para el manejo del fuego y en la toma de decisiones, ya que los incendios forestales son un fenómeno espacial, existen varios usos potenciales de la tecnología SIG para establecer estrategias para un manejo del fuego adecuado.

La frecuencia de incendios, el riesgo, la clase y cantidad de combustibles y las actividades humanas que provocan los incendios, plasmados en mapas, indicarán las áreas de mayor necesidad a atender, y permitirán estimar el número de personas requeridas para dominar los incendios (Santillán, 1986, citado por Rodríguez, 1996).



### 4.3. EVALUACIÓN DEL PELIGRO DE INCENDIOS FORESTALES

Como se mencionó anteriormente, a través de la generación de Índices de Peligro de Incendios es posible la evaluación del Peligro de Incendio además de definir las áreas con mayor susceptibilidad a este tipo de siniestros. Dichos Índices son estimados a partir del análisis de las variables físicas y biológicas del ambiente, mismas que tienen una gran influencia en la incidencia de incendios. Entre dichas variables se encuentran el complejo de combustibles forestales, los elementos del clima, la topografía y las actividades humanas que inciden en la ocurrencia de incendios forestales.

En los siguientes apartados se describen las principales variables que han sido consideradas en diversos estudios para la estimación de los Índices de Peligro de Incendios.

#### 4.3.1. La naturaleza del fuego

Es necesario, en primera instancia, definir la naturaleza del fuego, que, de acuerdo con el U.S. Department of Agriculture, Forest Service (1976), el fuego es una reacción química en la cual se produce energía. Cuando el material forestal arde, se produce una combinación química del oxígeno presente en el aire con la madera, resina y otros elementos inflamables contenidos en el combustible. En el bosque normalmente se encuentran tres estadios en el proceso de desarrollo del fuego, primero la chispa ignitiva, luego un periodo de ardimiento sin llama y finalmente la combustión de los materiales inflamables.

Existen tres condiciones que son requeridas en combinación para que la ignición y la combustión puedan ocurrir (calor, oxígeno y combustible). Si alguno de estos elementos se encuentra ausente, la ignición o la combustión no ocurrirán. Por otra parte, si los tres elementos no están en un balance apropiado, no habrá fuego. Las variaciones en balance entre el calor, oxígeno y combustible gobiernan la intensidad del incendio así como el comportamiento del fuego.

*Calor.* Debido a las variaciones en la naturaleza de los combustibles es difícil determinar la cantidad de calor que se requiere para que una partícula de combustible arda. La mayoría de los materiales de fácil combustión están compuestos por grandes cantidades de carbono. Los

materiales vegetales tienen un alto contenido de carbono y pueden encenderse a temperaturas relativamente bajas y cuando el contenido de humedad es bajo y el material está expuesto al aire. Durante la época de incendios forestales una gran parte de la materia vegetal en el bosque –ramas muertas, hojas, trozas, etc.- están suficientemente secas para ser encendidas fácilmente.

*Oxígeno.* Cuando el contenido de oxígeno del aire se reduce a menos de 15%, la mayoría de los combustibles no arderán. Por otra parte, algunos de los combustibles pueden estar dispuestos para que el aire, y consecuentemente el oxígeno no esté disponible en cantidades suficientes para que se lleve a cabo el fuego. En mantillos profundos y compactados, sólo las partículas que se encuentran en la superficie pueden disponer de cantidades de aire suficientes para permitir que el fuego se lleve a cabo. En este caso, el fuego se dará de la superficie a la parte menos superficial con la combustión teniendo lugar en cada capa como éstas vayan siendo expuestas al aire. Por otra parte, en una capa poco compactada de hojas, la masa entera está expuesta al aire y como consecuencia la combustión será rápida.

*Combustible.* En un bosque, el combustible es la variable más importante del triángulo del fuego y es lo más difícil de evaluar apropiadamente.

La facilidad de la ignición y combustión de los combustibles forestales depende principalmente del tipo de los mismos, su continuidad, contenido de humedad y la temperatura del combustible.

#### **4.3.2. El complejo de combustibles forestales**

Los combustibles forestales son una variable de gran importancia para definir el Peligro de Incendios Forestales, ya que el grado de Peligro estará en función del tipo de material combustible presente en cada una de las áreas forestales.

De acuerdo con Schwarz (1999), los materiales combustibles influyen directamente en el comportamiento del fuego. Es sabido que cuando un incendio está ocurriendo, y se desplaza de un tipo de material combustible a otro, su intensidad cambiará.

Los combustibles forestales son un producto de la fotosíntesis. Sin embargo, las características de un combustible luego de que la planta ha muerto o está inactiva son las que hacen posible la ocurrencia de un incendio forestal.

#### 4.3.2.1. Tipología de los combustibles forestales

Es necesario distinguir una clasificación de los combustibles forestales de acuerdo al lugar que ocupan dentro del sitio. De esta forma, existen combustibles terrestres, combustibles superficiales y combustibles aéreos.

Los *combustibles terrestres*, continúa Schwarz, tienen una combustión latente cuando hay oxígeno, y una vez que estos combustibles han encendido, es muy difícil controlar el fuego. Muy poca cantidad de calor producido es perdida debido a que la materia orgánica posee bajo un grado de conductividad.

Normalmente, los combustibles terrestres retienen mayores cantidades de humedad que otros combustibles, pero cuando alcanzan bajos contenidos de humedad contribuyen a la ocurrencia de incendios intensos.

La humedad contenida en estos combustibles juega un papel importante en el grado de peligro de incendios, y es posible generar índices de humedad de los combustibles e índices de sequía.

Bajo la clase de los *combustibles superficiales* es donde ocurren la gran mayoría de incendios. Los materiales ligeros están expuestos al aire, por lo que pierden humedad rápidamente y ocasionan velocidades altas de propagación del fuego. De esta manera, las velocidades de propagación en coberturas arbustivas son lentas, y depende de las características de las especies, qué tan verde se encuentra el material y la cantidad de material muerto. Los combustibles pesados requieren de largos periodos de baja humedad en el ambiente para que puedan convertirse en combustible disponible. Sin embargo, una vez encendidos, producen grandes cantidades de calor y arden por periodos de tiempo largos, lo que hace difícil el control de un incendio.

Por último, con respecto a los *combustibles aéreos*, es necesario resaltar que el aspecto más importante es el contenido de sustancias volátiles en las hojas de las plantas, así como su contenido de humedad. Este tipo de combustibles consiste en el material que se encuentra desde la punta de la copa hasta la altura de 1.3 m sobre la superficie del terreno.

Para su evaluación, los combustibles forestales han sido divididos por su estado fisiológico en combustibles forestales vivos y combustibles forestales muertos (figura 2). De acuerdo con Alvarado (1986), los combustibles muertos son aquellos que no tienen tejido vivo y yacen en el suelo, su contenido de humedad es gobernado casi completamente por la humedad ambiental, temperatura del aire y radiación solar. Los combustibles vivos están formados por plantas herbáceas, arbustos y el arbolado. Su característica principal como combustible es que el contenido de humedad es controlado fisiológicamente dentro de la planta.

Un aspecto importante a considerar es la división hecha a los combustibles muertos, en lo que se refiere a su peso, al distinguir entre combustibles ligeros y combustibles pesados. A los primeros se les atribuye la velocidad de propagación del incendio, así como a un peligro más alto, ya que son las partículas que encienden con mayor rapidez, por otra parte, los combustibles pesados están más relacionados con la intensidad que puede alcanzar un incendio.

Figura 2. Clasificación de los combustibles forestales

ESTADO FISIOLÓGICO	TIPO DE PARTÍCULAS	UBICACIÓN EN EL SITIO	PESO
<b>Combustibles forestales vivos</b>	<i>Vegetación herbácea</i>	<i>Superficiales</i>	
	<i>Vegetación arbustiva</i>	<i>Superficiales/aéreos</i>	
	<i>Vegetación arbórea</i>	<i>Aéreos</i>	
<b>Combustibles forestales muertos</b>	<i>Cama de combustibles</i>	<i>Terrestres</i>	
	<i>Partículas leñosas secas</i>	<i>Superficiales</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>— <b>Combustibles ligeros</b></li> <li>— <b>Combustibles pesados</b></li> </ul>

Los parámetros del complejo de combustibles que se evalúan son diversos, y están en función del tipo de estudio que se lleva a cabo. Para estudios sobre el comportamiento del fuego, suele evaluarse la cantidad de biomasa de los combustibles vivos. Para el caso de combustibles muertos los parámetros mayormente medidos son la carga de combustibles expresada en ton/ha, la humedad de los combustibles ligeros, densidad, compactación, continuidad horizontal y vertical, entre otros.

Sin embargo, para el caso de estudios sobre el Peligro de Incendios, el tipo de combustible más importante de evaluar es el de los combustibles muertos.

Para que los combustibles muertos puedan arder dependen principalmente de su contenido de humedad, pero también influyen otras características como compactación y tamaño. Para que un combustible leñoso arda, debe tener un contenido de humedad menor o igual a 25% (Rodríguez, 1996). El contenido de humedad de los combustibles guarda una estrecha relación con la humedad relativa del ambiente, sin embargo, esta humedad en los combustibles está cambiando cada instante. A raíz de lo anterior, Byram en 1963 acuñó el concepto de tiempo de retardo, que consiste en el tiempo que un combustible tarda en perder o en ganar dos tercios de la diferencia entre su contenido inicial de humedad y la del ambiente. Conforme el combustible es más grande, más lentamente perderá o ganará humedad y tendrá un mayor tiempo de retardo.

En función de lo anterior, Fosberg *et al.* (1970), citado por Alvarado (1986), han clasificado a los combustibles muertos en 1,10,100 y 1,000 horas promedio de tiempo de retardo.

#### *4.3.2.2. Evaluación de los combustibles forestales*

Existen diversas formas de evaluar el tipo y cantidad de combustibles forestales, mismas que difieren entre sí básicamente en función de la escala de trabajo.

Los estudios para evaluar la cantidad de combustibles forestales están encaminados hacia la estimación de la carga de combustibles, misma que se refiere al peso seco en estufa de combustible por unidad de área (Alvarado, 1986).

Para el caso de combustibles vivos, uno de los métodos más prácticos de evaluación es a través de modelos de estimación de biomasa que utilizan relaciones entre el peso y las dimensiones del individuo (Lyon, 1970; Buckman, 1966; Whittaker, 1965) citados por el U.S. Fish and Wildlife Service (2000).

Sin embargo, en áreas muy extensas es más práctico el aplicar el método de estimación del peso de la vegetación, que es un método no destructivo y requiere de un estimado del peso en parcelas de muestreo y es optimizado a través del empleo de un doble muestreo en parcelas cosechadas y pesadas. Otra técnica similar es estimar el peso relativo, que asume la facilidad de comparar el peso real con un peso-estimado. Consiste en establecer una parcela base, y la estimación del peso en las parcelas subsiguientes se estima como una fracción de la parcela base. Esta parcela se cosecha y entonces se calcula el peso de las parcelas restantes de forma proporcional U.S. Fish and Wildlife Service (2000).

Una de las técnicas más ampliamente utilizadas para la evaluación de combustibles muertos *in situ* a nivel de predio forestal es la técnica descrita por Brown en 1971 (Sánchez y Zercero, 1983), que consiste en el conteo de las intersecciones de las piezas leñosas en planos verticales. Sobre la base de este muestreo se estima el volumen, y el peso se calcula con base en el volumen y la aplicación de estimadores de gravedad específica del material leñoso.

Asimismo, Brown (1974), cita que este método se puede aplicar apropiadamente a cualquier tipo de bosque y que los procedimientos de inventario son fáciles y rápidos de usar.

Van Wagner (1982), describe este método como una faja de ancho infinitesimal y los datos colectados son los diámetros de las partículas leñosas en los puntos de intersección con la línea de muestreo. La línea de muestreo es, en realidad, un plano vertical. La suma de las secciones intersectadas es dividida por la longitud de la línea, dando como resultado el número de intersecciones por unidad de longitud. La multiplicación del numerador y el denominador por el ancho, convierte la línea en una faja de muestreo y el resultado puede ser expresado en volumen por unidad de superficie. Una vez obtenido el volumen, éste puede ser transformado a unidades para expresar el peso.

Las ecuaciones generales son las siguientes:

$$V = \left( \frac{k}{L} \right) d^2$$

$$W = \left( G \frac{k}{L} \right) d^2$$

donde  $V$  es el volumen por unidad de superficie;  $W$  el peso por unidad de área;  $d$  diámetro de la partícula en la intersección;  $L$  la longitud de la línea de muestreo;  $G$  la gravedad específica de la madera, y  $k$  la constante de transformación de volumen a ton/ha

#### 4.3.3. Variables meteorológicas

Las variables meteorológicas desempeñan un papel importante en la definición de los Índices de Peligro de Incendios y son consideradas en muchos estudios como el criterio fundamental para la definición de dichos Índices.

Los elementos del clima más importantes a considerar relacionados con la ocurrencia de incendios así como con su comportamiento, son la humedad relativa, temperatura, precipitación pluvial y el viento. Estos elementos influyen directamente en la humedad de los combustibles forestales (Private Forest Management Team, 1999).

En México, como en muchos otros países, los datos climáticos son obtenidos de forma puntual, es decir, a través de estaciones u observatorios meteorológicos distribuidos en el territorio, lo que hace necesario desarrollar metodologías orientadas al cálculo de valores meteorológicos en puntos donde no existen estaciones de medición. Para conocer la distribución espacial de estas variables se recurre comúnmente a técnicas de interpolación espacial y de esta forma obtener cartografía con valores continuos de las variables meteorológicas de interés.

#### 4.3.3.1. Estimación de datos meteorológicos faltantes

De acuerdo con Aparicio (1999), es frecuente que en un registro de precipitación falten los datos de un cierto periodo, debido a la ausencia del operador o a fallas del aparato registrador, sin embargo, se pueden estimar los datos faltantes si se tienen registros simultáneos de algunas estaciones situadas cerca de la estación en cuestión y uniformemente repartidas.

Por otra parte, Villalpando y García (1993), señalan que un problema que se presentó en la formación de la base de datos climatológicos para el estado de Jalisco, fue la carencia de información en algunas estaciones para ciertos periodos, y que, con la finalidad de presentar la base de datos lo más completa posible, se procedió a estimar, tanto los datos faltantes de algunos meses dentro de las series históricas, como las series completas de algunos elementos cuyos registros no fueron encontrados. Los métodos que emplearon para el estudio fueron la interpolación gráfica en un mapa para precipitación y evaporación, mientras que para la temperatura máxima y temperatura mínima se emplearon ecuaciones de regresión, donde la temperatura se estimó en función de la altitud.

Collins *et al.* (1996), sugieren la obtención de promedios a partir de los meses adyacentes al periodo sin datos para la estimación de datos faltantes de temperatura, para series mensuales de 10 años. En el caso de que los promedios de los meses adyacentes no existiesen, se recurriría a calcular el promedio mensual a partir de los registros diarios y considerando un número de observaciones de al menos 20 días por mes.

Por otra parte, Wanielista *et al.* (1997), señala para el caso de datos faltantes de precipitación, que si el promedio de precipitación anual en las 3 estaciones más cercanas difiere menos del 10% del promedio en la estación en cuestión, es factible utilizar la siguiente ecuación para estimar los datos faltantes:

$$\bar{P}_x = \left( \frac{P_A + P_B + P_C}{3} \right)$$

donde  $\bar{P}_x$  es la precipitación faltante estimada para el periodo x ;  $P_A$ ,  $P_B$ ,  $P_C$  la precipitación estimada en las estaciones A, B y C



Sin embargo, si la diferencia entre la precipitación media anual difiere en más del 10%, se utiliza un método de proporción normal, entendiendo esta normalidad como un promedio aritmético. Este método consiste en ponderar el valor de precipitación de cada estación adyacente por una proporción de los valores de precipitación anual:

$$\bar{P}_x = \frac{1}{3} [(N_x / N_A)P_A + (N_x / N_B)P_B + (N_x / N_C)P_C]$$

donde:

$N_x$  = Precipitación anual promedio para el periodo x

$N_i$  = Precipitación anual promedio en las estaciones adyacentes

Aparicio (1999), menciona que una manera de estimar los datos faltantes en las estaciones es a través de un análisis de correlación, en donde se correlacionan las precipitaciones medidas en una estación cercana o el promedio de las medidas en varias estaciones circundantes con la registrada en la estación bajo estudio. Una vez obtenida la gráfica de precipitación, y si la correlación es aceptable, bastaría conocer la precipitación de la estación más cercana, o bien, la precipitación media en las estaciones circundantes consideradas en el periodo en cuestión para deducir datos faltantes.

#### 4.3.3.2. Métodos de interpolación espacial

De acuerdo con Salas (1995), las técnicas de interpolación parten del análisis de las relaciones espaciales entre las variables climáticas y una serie de variables ligadas al territorio, como son la topografía (altitud, orientación, pendiente), localización geográfica (latitud, longitud, distancia) y cobertura vegetal. Todas estas variables pueden incorporarse a un SIG, aprovechando además sus herramientas de modelización para la estimación de datos en áreas sobre las que no existen estaciones meteorológicas.

Por otro lado, Waters (2000), señala que la interpolación espacial es el procedimiento de estimación de valores de ciertos atributos en localidades carentes de datos dentro de un área cubierta por observaciones existentes y tiene su fundamento en la Ley Geográfica de Tobler's,

la cual se asume que los puntos más cercanos a una observación en el espacio poseen valores más similares a ésta que los puntos más alejados de las localidades que poseen observaciones.

Burrough y McDonell, 1998, citados por Anónimo (2000), mencionan que los métodos de interpolación son generalmente agrupados en métodos globales y en métodos locales. La principal diferencia entre estos dos grupos reside en el uso de puntos con valores conocidos para estimar valores no conocidos. De esta forma, un método global utiliza todos los puntos disponibles para la estimación del un valor, mientras un método local utiliza sólo una muestra del total de puntos disponibles para llevar a cabo la estimación.

Salas 1995, aborda una división de métodos de interpolación espacial, por una parte, aquellos métodos que se basan en la localización geográfica de los puntos a estimar y por otra los métodos de interpolación por funciones de regresión, que no consideran directamente dicha localización.

A continuación se presenta una breve descripción de los métodos locales de interpolación espacial así como de aquellos basados en funciones de regresión debido a que son los más útiles para estimar valores a escalas más o menos grandes y por tal motivo no se describirán los métodos globales, que no distinguen variaciones locales con respecto al tipo de variables a interpolar.

#### *4.3.3.2.1. Métodos locales de interpolación espacial*

El método de *Polígonos de Thiessen*, de acuerdo con ESRI (1998), es aquel a través del cual se generan polígonos cuyos límites definen el área que se encuentra más cercana en relación con otros puntos, es decir, un área de influencia de cada punto. Los polígonos de thiessen son creados con base en una serie de puntos y están definidos matemáticamente por los bisectores perpendiculares de las líneas que unen a todos los puntos, para lo cual se utiliza una estructura de triángulos irregulares.

Este método tiene la ventaja de que el tiempo de duración de los cálculos en un SIG es relativamente rápido, sin embargo, debido a su estructura, los polígonos presentan cambios

abruptos en sus límites. Originalmente se utilizó este método para calcular estimaciones superficiales con datos de precipitación (Waters, 2000).

Uno de los métodos más comúnmente utilizados es el método basado en la *ponderación con el inverso de la distancia*. Este método asume que un valor puntual no conocido está influenciado mayormente por los puntos más cercanos con valor conocido (puntos de control) que por aquellos que se encuentran más lejanos. El grado de influencia está controlado por el inverso de la distancia entre puntos elevados a una  $x$  potencia. Un exponente de 1.0 significa un coeficiente constante de cambio en los valores entre los puntos, y entonces se trata de una interpolación lineal. Un exponente de 2.0 o mayor sugiere que el coeficiente de cambio en los valores es mayor en la cercanía de un punto con valor conocido y se nivela conforme aumenta la distancia.

La ecuación general para este método es la siguiente:

$$Z_0 = \frac{\sum_{i=1}^s Z_i \frac{1}{d_i^z}}{\sum_{i=1}^s \frac{1}{d_i^k}}$$

siendo  $Z_0$  el valor estimado en el punto 0;  $Z_i$  el valor de  $Z$  en un punto de control;  $d_i$  la distancia entre el punto de control  $i$  y el punto 0;  $s$  el número de puntos de control utilizados en la estimación, y,  $k$  el exponente de la potencia especificada

De acuerdo con Waters (2000), se puede usar una gran cantidad de algoritmos, en cuyas variaciones se considera la naturaleza de la función de distancia, el número de puntos de control a utilizar y la dirección con la cual son seleccionados dichos puntos. Además señala que es el método más ampliamente utilizado.

El método de interpolación conocido como *kriging*, considera la autocorrelación espacial de la variable mediante el cálculo de un semivariograma (varianza espacial), que se utiliza como función de la interpolación (Bosque, 1992, citado por Salas, 1995). Los valores

interpolados se obtienen mediante una combinación lineal ponderada de los valores de la variable en los observatorios meteorológicos.

Sárközy (1998), señala que el método kriging estima los valores no conocidos con las varianzas mínimas sólo si los datos conocidos cumplen algunas condiciones de estacionalidad. En los casos en donde no se cumpla esta premisa puede utilizarse la variante denominada *universal kriging*. Esta modalidad no tiene una solución única y necesita una gran cantidad de trabajo interactivo y evaluación subjetiva durante el proceso de análisis.

Collins (1996), llevó a cabo una comparación entre 6 métodos de interpolación espacial para la estimación de la temperatura media, máxima y mínima a nivel mensual y estacional en algunas zonas de los estados de North Carolina, South Carolina y Georgia, E.U.A. Los resultados fueron analizados a través de un análisis de varianza y los métodos fueron evaluados con base en el error presentado. Los métodos que presentaron el menor error fueron la regresión polinomial y el método del gradiente térmico debido a la inclusión de la relación temperatura-altitud.

Hägmark (1999), utilizó el método de interpolación óptima para representar espacialmente la temperatura. Consideró, además de la distancia horizontal entre las estaciones, la altitud y una relación entre los datos obtenidos en función con la cercanía al mar, lo que permitió la descripción de variaciones locales entre áreas montañosas y áreas costeras. Para la precipitación, estableció una relación entre el viento, orografía y la latitud, con lo que explicó en un 50% la varianza de la precipitación.

Medina *et al.* (1997), en el módulo de clima para la determinación del potencial productivo de especies vegetales en México, aplicaron una interpolación que estima un valor para cada punto considerando los valores de las cinco estaciones más cercanas a este punto obteniendo un promedio ponderado y dándole mayor peso a la estación más cercana de acuerdo con el inverso de la distancia al cuadrado. Las variables interpoladas fueron temperatura máxima, temperatura mínima, precipitación y evaporación.

Brenner *et al.* (1998), utilizaron la interpolación basada en el inverso del cuadrado de la distancia para la cartografía de las variables climáticas temperatura máxima, mínima y

humedad relativa para alimentar el Spatial Fire Management System en el estado de Florida, Estados Unidos de América.

#### 4.3.3.2.2. Métodos de interpolación a través de funciones de regresión

Salas (1995), considera que una primera aproximación de estas técnicas a la estimación de datos climáticos en aquellas áreas en donde no se cuenta con estaciones meteorológicas, se basa en el cálculo de una función de regresión entre la precipitación o la temperatura y la altitud del lugar.

Ninyerola *et al.* (2000), utilizaron modelos de regresión lineal múltiple para la estimación las variables temperatura media máxima mensual, temperatura media mínima mensual, temperatura media mensual y precipitación total anual para el área de Cataluña, en la península ibérica.

Considerando series de datos de 15 años para el caso de temperatura y 20 años para el caso de precipitación y un total de 86 estaciones con datos de temperatura y 142 estaciones con datos de precipitación, proponen como variables independientes la altitud, latitud, continentalidad y radiación solar para la estimación de la temperatura. Para el caso de precipitación utilizan las mismas variables independientes, cambiando únicamente la variable radiación solar por nubosidad.

De esta forma, los modelos resultantes fueron:

$$y = b_0 + b_1(ALT) + b_2(LAT) + b_3(CON) + b_4(RAD) \text{ para el caso de la temperatura } y,$$

$$y = b_0 + b_1(ALT) + b_2(LAT) + b_3(CON) + b_4(CLO) \text{ para el caso de la precipitación}$$

siendo  $y$  el valor climático a estimar; ALT la altitud media sobre el nivel del mar; LAT la latitud, expresada como el coseno de la latitud; CON continentalidad, expresada como la distancia lineal al mar; RAD radiación solar, y, CLO nubosidad

Para este estudio, se encontraron mejores estimadores para las estaciones de primavera y otoño para las estimaciones de temperatura, mientras que para la precipitación, los mejores estimadores fueron para el verano.

En un estudio similar, Sánchez *et al.* (1999), seleccionaron un periodo de 1940 a 1989 para la estimación de temperatura media mensual, temperatura media anual, temperatura media de las máximas del mes más cálido y media de las mínimas del mes más frío en la península ibérica. Para el caso de la precipitación, estimaron la precipitación mensual y la precipitación total anual. A diferencia del estudio de Ninyerola, sólo utilizaron como variables independientes la altitud, latitud y longitud.

El modelo general de regresión lineal múltiple es el siguiente:

$$Vc = a + b\left(\frac{altitud}{10^3}\right) + c\left(\frac{Xutm}{10^5}\right) + d\left(\frac{Yutm}{10^5}\right) + e\left(\frac{altitud}{10^3}\right)^2 + f\left(\frac{Xutm}{10^5}\right)^2 + g\left(\frac{Yutm}{10^5}\right)^2$$

donde  $Vc$  representa el valor climático a estimar; *altitud* la altitud media sobre el nivel del mar; *Xutm* el valor de la coordenada en el eje de las X del sistema de coordenadas UTM; *Yutm* el valor de la coordenada en el eje de las Y del sistema de coordenadas UTM

Además, los autores explican que la transformación del cuadrado de la variable, en muchos casos puede aportar una mayor explicación que la variable simple.

Los estudios para realizar estimaciones de la humedad relativa son escasos, y se basan en la extrapolación de datos de humedad relativa obtenidos de observatorios meteorológicos ubicados cerca del área de interés.

La humedad relativa, de acuerdo con García (1986), es la relación que existe entre la cantidad de vapor de agua que contiene el aire y el máximo que puede contener a una cierta temperatura.

Esta gran dependencia de la humedad relativa con respecto a la temperatura, ha dado lugar a que su estimación se realice a partir de las mediciones de temperatura de la zona de estudio.

Hungerford (1989), citado por Salas (1995), a través del programa MTCLIM (Mountain Microclimate Simulation Model), realiza el cálculo de la humedad relativa mediante la relación entre la densidad de vapor ambiente y la de vapor saturado. Su expresión matemática es:

$$H = (ES/ESD)*100$$

siendo  $H$  la humedad relativa media diaria durante las horas de Sol en %;  $ES$  la densidad de vapor saturado, y,  $ESD$  la presión a la temperatura del aire

Alcalá y Ruiz (1995), utilizaron información climatológica de 12 observatorios meteorológicos, y utilizaron la forma de modelo generalizado:

$$Hr = a + b Pm$$

donde  $Hr$  es la humedad relativa mensual;  $Pm$  la precipitación mensual;  $a$  y  $b$  constantes

Para todas las estaciones obtuvieron la ecuación lineal para la recta de mínimos cuadrados que describe la relación entre humedad relativa y precipitación. Dichos autores lograron explicar un 80% de la variación de la humedad relativa en función de la precipitación mensual. Este modelo mostró buen ajuste durante los meses de julio a enero, no así en la temporada más seca del año donde el modelo presentó considerable sesgo en las estimaciones de humedad relativa.

#### 4.3.4. Variables topográficas

Desde el punto de vista del Peligro de Incendios Forestales, el análisis de las propiedades del relieve puede ser tomado en cuenta con base en dos premisas importantes, la primera, definida como la relación existente entre los rasgos del terreno y la propagación y la dificultad para controlar un incendio, determinada básicamente por la pendiente, además de que las condiciones de un incendio varían de acuerdo a la exposición del terreno. La segunda premisa parte de la relación entre la altitud, y la orientación de las laderas con la variabilidad local de elementos del clima tales como la temperatura y la precipitación.

De acuerdo con el U.S. Department of Agriculture, Forest Service (1976), en general, las pendientes orientadas al sur y al suroeste proveen de condiciones favorables para la ignición, ya que estas exposiciones reciben energía solar más directamente y por consiguiente la temperatura del aire y de los combustibles forestales es más alta.

Como ya se comentó, la altitud sobre el nivel medio del mar juega un papel determinante en la variación espacial de la temperatura y la precipitación y por ello ha sido incluida en la mayoría de los estudios sobre estimaciones termopluviométricas.

Otro aspecto importante a señalar es la incidencia de incendios en función de la altitud. En las montañas Rocosas al norte de los Estados Unidos de América, el 35% de los incendios ocurren en la cima de las montañas más que en otras posiciones, debido a que durante una tormenta eléctrica, los rayos alcanzan más fácilmente la cima U.S. Department of Agriculture, Forest Service (1976).

##### *4.3.4.1. Construcción de Modelos Digitales del Terreno*

Los rasgos topográficos pueden ser representados geográficamente a través de la construcción de Modelos Digitales del Terreno (MDT). Felicísimo (1994), propone que un MDT es una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua.



Por su parte, el U. S. Geological Survey (1996), define a un MDT como una representación de una porción del territorio en una superficie bidimensional.

Un MDT es generado a partir de un arreglo regular de valores de elevación, derivados de mapas topográficos, fotografías aéreas o imágenes de satélite.

#### 4.3.4.1.1. Construcción de Modelos Digitales Derivados

A partir de un MDE (Modelo Digital de Elevaciones), es posible construir un conjunto de modelos digitales que representan variables derivadas directamente de la topografía.

Uno de los Modelos Digitales más útiles es el Modelo Digital de Pendientes (MDP). Para su cálculo, es necesario aplicar un filtro que detecte la diferencia de alturas en la dirección de las  $x$ ,  $y$ , otro filtro que detecte la diferencia de alturas en la dirección de las  $y$ . Una vez teniendo estas diferencias, son multiplicadas por la distancia entre los pares de puntos en la matriz de datos del modelo. Esta distancia está dada por la resolución espacial del MDE. (International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences, 1997).

De esta forma, el cálculo de la pendiente se realiza mediante la siguiente expresión:

$$s\% = 100 \left( \frac{h}{d} \right)$$

siendo  $s\%$  el porcentaje de pendiente;  $h$  la diferencia de alturas entre dos puntos,  $y$ ,  $d$  la distancia entre dos puntos en la matriz de datos

Otro Modelo Digital Derivado es el Modelo Digital de Aspecto (MDA), también llamado Modelo Digital de Orientación de Pendientes.

Este modelo es generado, al igual que el MDP, a través del uso de filtros para calcular gradientes verticales y horizontales. De acuerdo con Felicísimo (1994), la orientación en un punto puede definirse como el ángulo existente entre el vector que señala el Norte,  $\vec{N}$ , y la proyección sobre el plano horizontal del vector gradiente  $\vec{P}_H$ .

El valor de orientación se estima, por lo tanto, directamente a partir de los valores del gradiente:

$$\phi = \tan^{-1} \left( \frac{a_{10}}{a_{01}} \right)$$

donde  $\phi$  representa el arco tangente;  $a_{10}$  el gradiente en la dirección de las x;  $a_{01}$  es el gradiente en la dirección de las y

#### 4.3.5. Variables socioeconómicas y culturales

Debido a que en México la gran mayoría de los incendios forestales son ocasionados por actividades humanas, surge la necesidad de incluir rasgos sociales, económicos y culturales en los Modelos de Evaluación del Peligro de Incendios Forestales.

Chuvieco *et al.* (2000), señalan que la mayoría de los modelos de Peligro de Incendios no incluyen la distribución espacial del riesgo por actividades humanas debido a la dificultad en el modelado de actividades relacionadas con el fuego, por lo tanto, la inclusión de componentes humanos relacionados con el riesgo es crucial. Un acercamiento para resolver esta dificultad es la cartografía de la distribución espacial del impacto humano de forma indirecta, basada en variables auxiliares como accesibilidad e incidencia de incendios en un área dada.

Marín (1984), citado por Magaña (1985), trató de encontrar la relación que existe entre los incendios en los bosques y factores como la densidad de población, la población económicamente activa e inactiva, el porcentaje de la población urbana y rural, el número y tipo de ganado y los tipos de tenencia de la tierra, entre otros.

García *et al.* (1999), señalan que el desarrollo de un modelo de predicción de incendios siempre presenta una gran dificultad, debido a la incertidumbre asociada al comportamiento humano con relación al fuego. Los autores citados utilizaron variables geográficas y temporales para estimar indirectamente el riesgo humano en ciertas áreas, para periodos

específicos de tiempo en Whitecourt Forest, Canadá. Las variables geográficas empleadas fueron la distancia a carreteras, a ciudades, a áreas de campamento, tipo de propiedad y valor comercial de la masa forestal.

Almeida (1994), utilizó la distancia a caminos como variable predictora de peligro, ya que estos representan áreas de alto riesgo debido a la influencia de las actividades humanas en Vila Nova de Poiares, en el centro de Portugal.

Por su parte, Knockaert *et al.* (1991), trabajando en la zona de los grandes incendios de Quintana Roo, definieron las probabilidades de protección con base en tres parámetros: riesgo, peligro y daño potencial. El riesgo incluyó aspectos como densidad de población, densidad de incendios por municipio, red vial, sectores de campamento recreativo y distribución espacial de la ocurrencia acumulada de incendios (Magaña, 1985).

#### **4.3.6. Integración de variables para la estimación de Índices de Peligro de Incendios Forestales**

Una vez teniendo el número de variables deseadas para la estimación de los Índices de Peligro de Incendios, es necesario considerar la técnica para integrarlas a través de un Sistema de Información Geográfica.

De acuerdo con Eastman (1999), para solucionar un objetivo específico, es frecuente que se recurra a diversos criterios a evaluar. Este proceso es llamado Evaluación Multicriterio (EMC). Sin embargo, un término comúnmente asignado a este proceso es la modelización.

La EMC, continúa Eastman, es comúnmente concebida como uno de dos procesos. El primero se refiere a *Operaciones Booleanas*, donde todos los criterios son reducidos a expresiones lógicas de conveniencia y entonces son combinadas por medio de uno o más operadores como una intersección (AND) y una unión (OR). El segundo proceso es conocido como *Combinación Lineal Ponderada*, en donde los criterios son estandarizados a un rango numérico común y entonces son combinados a través de un promedio ponderado. El resultado son datos geográficos continuos acerca de una conveniencia particular, que pueden ser

contrapuestos con ciertas restricciones lógicas y dar lugar a criterios de orden cualitativo y finalmente obtener la decisión final.

De acuerdo con Malczewski (1997), las principales características de los problemas que involucran una toma de decisiones a nivel espacial son:

- un número alto de alternativas de decisión
- los resultados o consecuencias de las alternativas de decisión son variables espacialmente
- cada alternativa es evaluada en un contexto de múltiples criterios
- algunos de los criterios pueden ser de carácter cualitativo mientras otros pueden ser de orden cuantitativo
- comúnmente hay más de un grupo de personas involucrados en el proceso de toma de decisiones
- cada uno de los evaluadores tienen distintas preferencias con respecto a la importancia relativa en la evaluación de los criterios así como en las consecuencias que puede traer una decisión
- las decisiones están sujetas, en ocasiones a un grado de incertidumbre

Heywood *et al.* (1994). señala que, la EMC, como un proceso para integrar datos espaciales en función de su importancia en el proceso de toma de decisiones, ha recibido escasa atención en la literatura sobre Sistemas de Información Geográfica. Sólo unos cuantos investigadores han explorado el potencial de la EMC como una herramienta en un SIG.

Gutiérrez *et al.* (1997), para el diseño de un mapa de riesgo de incendios en el Parque Nacional El Avila en Venezuela, aplicaron un enfoque de toma de decisiones multicriterio, el cual se puede definir como un conjunto de conceptos, aproximaciones, modelos y métodos que sirven como soporte para seleccionar, evaluar, jerarquizar o rechazar soluciones en base a una evaluación expresada en puntuaciones, valores o intensidades de preferencia, de acuerdo a lo criterios seleccionados, para auxiliar la toma de decisiones.

Eastman (1999), define que la EMC tiene los siguientes componentes:

- *Decisión*, se refiere a la elección entre diversas alternativas. Estas alternativas pueden representar diferentes hipótesis acerca del rasgo objeto de estudio, diferentes clasificaciones. Este conjunto de alternativas es conocido como la estructura de decisión. La estructura de decisión debe ser distinguida de los individuos a los cuales la decisión es aplicada, y entonces generar un conjunto de candidatos receptores de una decisión. Finalmente, un grupo de decisiones es aquel grupo de individuos a los que les es asignada una alternativa específica contenida en la estructura de decisión.
- *Criterio*, un criterio es una base que soporta una decisión y esta base puede ser medida y evaluada. Los criterios pueden ser de dos tipos: *factores* y *restricciones*. Un factor es un criterio que intensifica o disminuye la capacidad de conveniencia de una alternativa específica para una actividad considerada; comúnmente los factores son medidos en una escala continua. Por otra parte, una restricción sirve para limitar las alternativas bajo consideración. En muchos casos las restricciones son expresadas en forma lógica.
- *Regla de decisión*, es el proceso por el cual los criterios son seleccionados y combinados para llegar a una evaluación particular y por la cual las evaluaciones pueden ser comparadas. Las reglas de decisión contienen procedimientos para combinar criterios en un índice compuesto y una expresión que muestra cómo las alternativas son comparadas utilizando este índice.
- *Objetivo*, en función de un objetivo específico se encuentran estructuradas las reglas de decisión. Un objetivo es una perspectiva que funge como guía en la estructuración de reglas de decisión.
- *Evaluación*, es el proceso de aplicación de la regla de decisión.

De acuerdo con Malczewski (1999), la secuencia de actividades dentro de la estructura de la EMC consiste en:

- a) *definición del problema*, cualquier proceso de toma de decisiones comienza por reconocer y definir el problema de decisión. De forma breve, el problema de decisión es la diferencia percibida entre los estados deseados y los actuales dentro de un Sistema.
- b) *criterios de evaluación*, esta etapa involucra (1) una serie de objetivos que reflejan todo lo concerniente al problema de decisión y (2) atributos que permitan lograr los objetivos, para lo cual se establece una escala de medición de los atributos. Esta evaluación está asociada con rasgos geográficos y sus interrelaciones, mismas que pueden ser representadas a través de mapas con atributos asociados.
- c) *generación de alternativas*, esta actividad debe fundamentarse en una estructura de valores, misma que se relaciona a la serie de criterios de evaluación. Es decir, a cada alternativa se le es asignada una variable de decisión o factor.
- d) *peso de los criterios*, en este punto, las preferencias del evaluador con respecto a los criterios de evaluación son incorporadas al modelo de decisión. Dichas preferencias son expresadas en términos de peso de relativa importancia que son asignados a los criterios de evaluación. El propósito de esta asignación de pesos es expresar la importancia de cada uno de los criterios en relación con otros criterios. La derivación del peso de los criterios es la etapa central de la evaluación, y, dadas las alternativas, atributos y la importancia de cada criterio, los datos de entrada al modelo de decisión pueden ser organizados en forma de una matriz o tabla de decisión.
- e) *reglas de decisión*, las medidas unidimensionales (datos geográficos) y los juicios de preferencia, deben ser integrados para llevar a cabo la evaluación de las alternativas, lo cual se logra a través de una regla de decisión o función de agregación. Las reglas de decisión son las que dictan la forma de jerarquizar alternativas o decidir cual alternativa es preferida sobre otra.
- f) *análisis de sensibilidad*, es usado para identificar los efectos de los cambios en las entradas del modelo (datos geográficos y las preferencias del evaluador) con respecto a

las salidas (jerarquización de alternativas). Si los cambios no afectan significativamente las salidas, la jerarquización es considerada como adecuada.

g) *recomendación*, es la fase final del proceso de toma de decisiones y debe estar basada en el análisis de sensibilidad. Debe, además, incluir la descripción de la mejor alternativa o grupo de alternativas consideradas como candidatas para su implementación. Las soluciones de los problemas espaciales de decisión deben ser presentadas a través de cartografía.

Gutiérrez *et al.* (1997), utilizó el método de sumatoria lineal ponderada, técnica aditiva, donde las puntuaciones de los criterios son recodificadas, para así llevar a cabo relaciones entre criterios y poder comparar entre criterios para una misma alternativa:

$$r_i = \sum_{j=1}^n w_j x_{ij}$$

donde  $r_i$  es el índice o mapa objetivo;  $w_j$  el peso del criterio  $j$ ,  $y$ ,  $x_{ij}$  el valor de la alternativa  $i$  del criterio  $j$

Así, Gutiérrez y colaboradores consideraron tres objetivos complementarios, que fueron la amenaza de fuego, referida a la posibilidad y severidad de que ocurriese un evento de fuego, condicionado por los factores físico-naturales que intervienen en la ocurrencia. El segundo objetivo fue la vulnerabilidad al fuego, definiendo esta como la propensión a producirse un incendio por la acción ejercida por actividades humanas. Y, el tercer objetivo fue el daño potencial, referido a la afectación sobre la vegetación y procesos de erosión ocasionados por un incendio.

Radke (2000), utilizó un modelo de toma de decisiones para evaluar el riesgo de incendios así como el comportamiento del fuego en una porción del estado de California, E.U.A., utilizando como criterios el estado del tiempo, la topografía y el tipo de combustible forestal, asignándoles un peso relativo a cada uno de estos criterios.

## 5. MATERIALES Y METODOLOGÍA

### 5.1. UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El Ejido Corona del Rosal se ubica en el municipio de Galeana, al sureste del estado de Nuevo León, ocupando una superficie de 6,646.42 ha.

Administrativamente, se encuentra dentro del área de influencia del Distrito de Desarrollo Rural Galeana y de la Unidad de Conservación y Desarrollo Forestal No. 1 "Galeana".

Geográficamente se localiza entre los  $24^{\circ} 27' 23''$  y los  $24^{\circ} 32' 51''$  de latitud norte y entre los  $99^{\circ} 53' 54''$  y los  $100^{\circ} 01' 34''$  de longitud oeste:

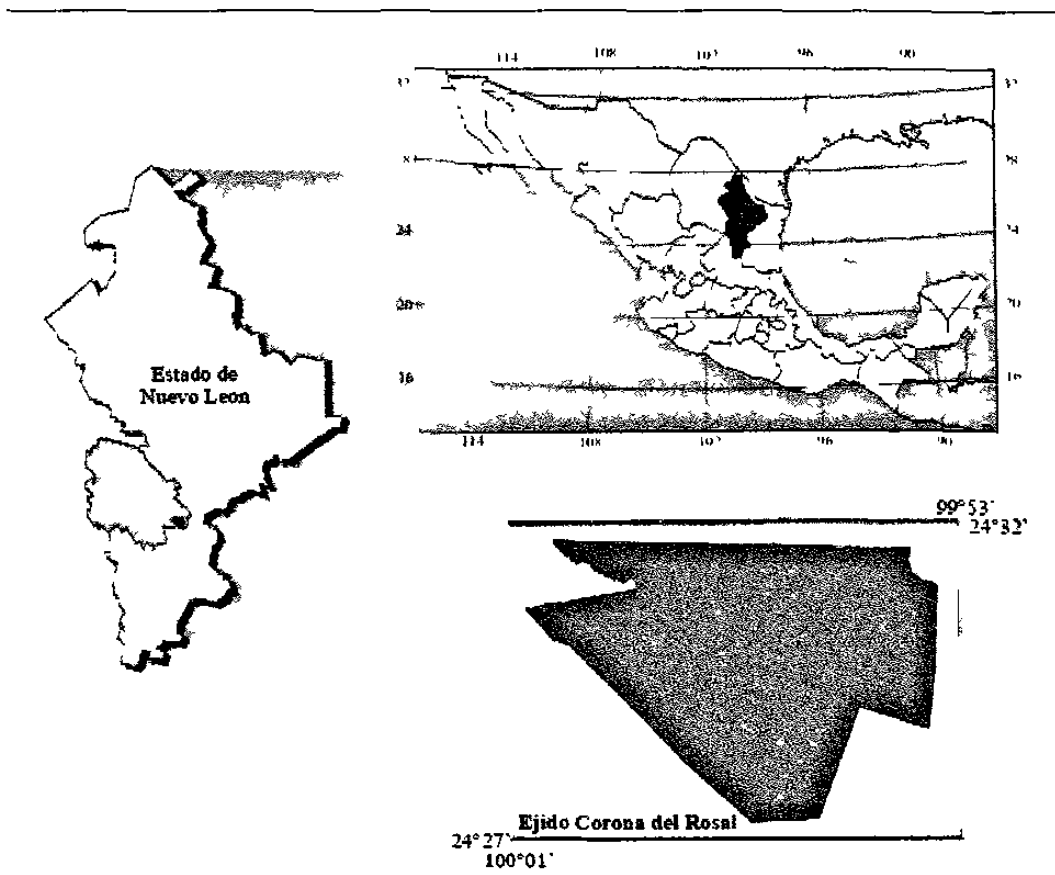


Figura 3. Ubicación del área de estudio



## 5.2. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

### 5.2.1. Fisiografía

El Ejido Corona del Rosal se localiza en la provincia fisiográfica de la Sierra Madre Oriental, la cual corre desde sus límites con la del Eje Neovolcánico en sentido paralelo a la costa del Golfo de México.

La subprovincia dentro de la cual se localiza el Ejido, es la Gran Sierra Plegada, en ella dominan las capas plegadas de calizas con predominantes ejes estructurales de anticlinales y sinclinales, una gran falla inversa corre sobre los bordes orientales de la sierra en tanto se extienden más o menos paralelas a aquellas y a los ejes estructurales, también hay afloramientos yesíferos paralelos en el mismo sentido particularmente del lado occidental de la sierra y fosforitas.

### 5.2.2. Topografía

La topografía del terreno es muy irregular, presentándose áreas planas con pendiente de 2 % hasta zonas abruptas que llegan a alcanzar hasta 100 %.

El gradiente altitudinal es de 1620 m, siendo la menor altitud a los 1540 msnmm y los puntos con mayor altitud se encuentran en parajes conocidos como "El Infiernillo", "Las Bancas" y "La Zacatosa", que alcanzan hasta los 3160 msnmm.

### 5.2.3. Clima

De acuerdo con la clasificación climática de Köppen modificada por García (1973), para la región, el clima se define como del grupo de climas secos, del tipo semiseco, subtipo semiseco templado con verano cálido ( $BS_{1k}(x')$ ), con temperatura media anual entre 12 °C y 18 °C, con temperatura del mes más frío entre -3 °C y 18 °C y la temperatura del mes más cálido mayor de 18 °C. El régimen de lluvias es de escasas todo el año y un porcentaje de lluvias invernales menor del 18 % con respecto al total anual.

#### 5.2.4. Suelos

En el área predominan los suelos someros, mismos que se encuentran en diversos grados de asociación, entre los que se distinguen los grupos Litosol, Rendzina y Regosol con una clase textural media

#### 5.2.4. Vegetación

Los tipos de vegetación que se encuentran en el área son muy variados, predominando los chaparrales en distintos grados de asociación con bosques de clima templado y algunos matorrales. Se encuentran, además, bosques puros de pino, cuyas especie dominantes son *Pinus pseudostrobus*, en las partes altas y *Pinus cembroides*, en las partes bajas; bosques mezclados de pino-encino en diversos grados de asociación y por último áreas en donde se practican la agricultura de temporal y la inducción de pastizales para el pastoreo de ganado.

#### 5.2.5. Aprovechamiento forestal

Las áreas arboladas aprovechables dentro del Ejido Corona del Rosal corresponden a 1,722 ha, y se encuentran sometidas al aprovechamiento forestal comercial. La posibilidad anual aproximada es de 60,000 m<sup>3</sup>. Las especies con valor comercial son *Pinus pseudostrobus*, *Pinus teocote*, *Pinus cembroides* y *Quercus spp.* U.C.D.F. No. 1 (1996 )

### 5.3. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

#### 5.3.1. Actualización cartográfica

Para caracterizar el complejo de combustibles forestales, se planteó la estratificación de la vegetación comprendida en las áreas arboladas del Ejido Corona del Rosal. De esta forma, fue necesario contar con cartografía que describiese los tipos de vegetación y sus distintos grados de asociación. Como primera aproximación se digitalizaron los polígonos de vegetación editados por el INEGI en 1976 y en 1978 a partir de las cartas G14C66, G14C67 y G14C77 de uso del suelo y vegetación escala 1 : 50,000.

Debido a que dichas cartas fueron editadas aproximadamente 25 años atrás, y considerando que la vegetación pudo haber tenido modificaciones en cuanto a tipo y superficie, ocasionadas principalmente por la presión ejercida por el aprovechamiento forestal y áreas agrícolas, se procedió a llevar a cabo la actualización de la vegetación a través de fotografías aéreas de los años 1996 y 1999. Esta actualización aseguró que los puntos de muestreo distribuidos posteriormente en las áreas arboladas correspondieran a cada uno de los tipos de vegetación actual.

Para el desarrollo de esta fase se empleó el programa ILWIS<sup>®</sup>2.1 for Windows<sup>®</sup>, ejecutado en una computadora personal con procesador Pentium II a 300 Mhz, RAM de 64 Mb y disco duro de 6 GB.

Las dimensiones de las fotografías utilizadas fueron de 23 cm x 23 cm, distancia focal de 152.16 mm, una escala nominal de 1 : 75,000 y fechas de vuelo de enero de 1996 y agosto de 1999.

Se digitalizaron las fotografías 7 y 8 de la línea de vuelo 156 correspondiente a la zona G-14-10 y las fotografías 8 y 9 de la línea de vuelo 157 correspondiente a la zona G-14-11. Cada fotografía fue digitalizada con una resolución de 450 puntos por pulgada, para obtener una escala de 1 : 50,000 en la ortofoto final (figura 4). Cada una de las fotografías fue referenciada geográficamente con el método *Projective transformation and relief displacement*, incluido en el programa ILWIS<sup>®</sup>. Dicho método requiere de la información de

los valores de coordenadas tanto en el eje  $x$  como en el  $y$  de los puntos de control, además de considerar la altitud sobre el nivel del mar, obtenida de un Modelo Digital de Elevaciones con una resolución de 90 m. A través de esta transformación fue corregida la distorsión ocasionada por el relieve en las fotografías.

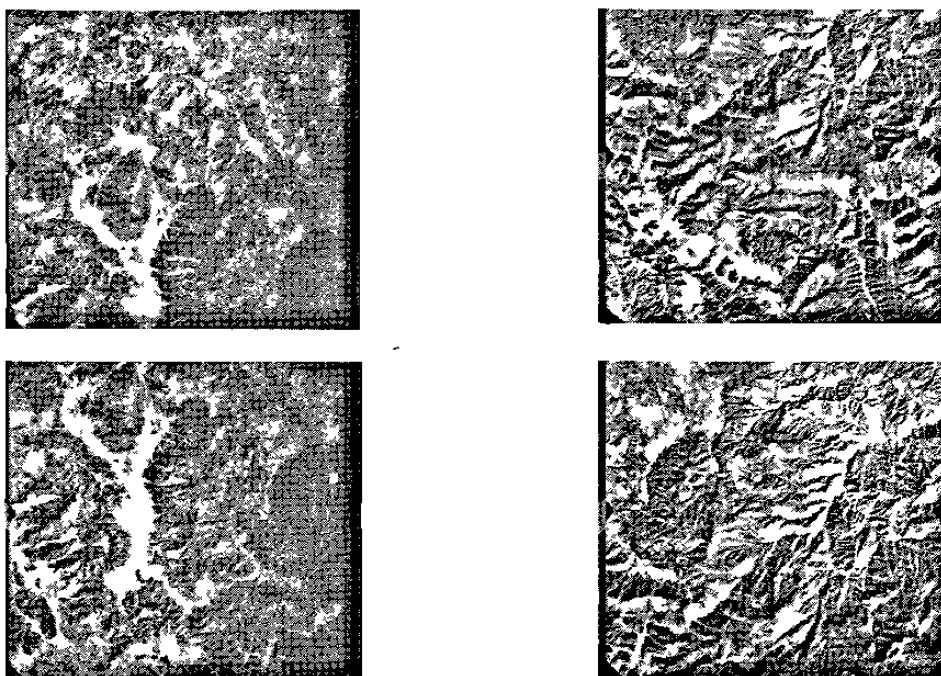


Figura 4. Fotografías aéreas correspondientes a las líneas de vuelo empleadas antes de ser referenciadas geográficamente

Se distribuyeron un promedio de 20 puntos de control en cada fotografía (figura 5). Matemáticamente se requiere de un mínimo de 3 ó 4 puntos por fotografía para la aplicación de este método, sin embargo, esta consideración es válida en zonas donde la topografía es suave, por lo que fue necesario introducir un número mayor de puntos dada la naturaleza abrupta de la topografía en la zona, asegurándose con esto una mejor distribución de puntos de control y una corrección y referenciación geográfica adecuadas.

Cada uno de los valores de las coordenadas en ambos ejes fue obtenido de una carta topográfica escala 1 : 50,000, y fueron referidos a sus valores correspondientes de filas y columnas en la fotografía digitalizada.

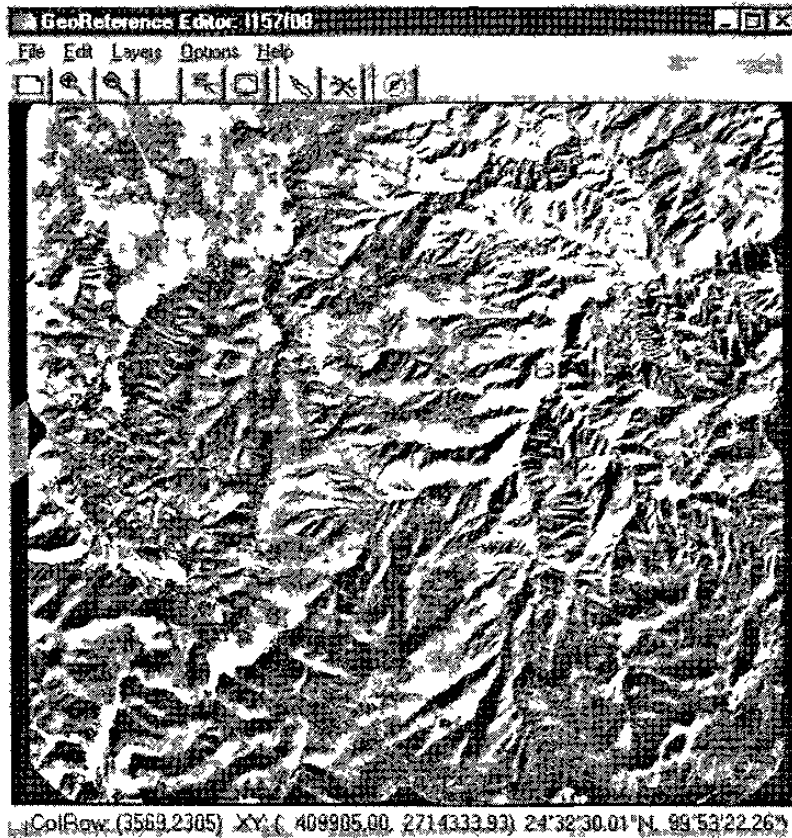


Figura 5. Distribución de puntos de control en una fotografía aérea

La proyección empleada para la referenciación geográfica fue la Proyección Universal Transversa de Mercator y el Sistema de Coordenadas UTM referidas a la zona 14. El error medio cuadrático permitido fue de hasta 4 píxeles, considerando un tamaño de pixel de 4 m ( $\sigma = 4$ ). El valor  $\sigma$ , se refiere a una medida de la variabilidad de mediciones (columna, fila en la imagen) con respecto a sus valores reales (X, Y).

Luego de referenciar geográficamente cada una de las fotografías, se llevó a cabo la corrección geométrica de las mismas, para asignarle la orientación adecuada a las fotografías, utilizando el método del pixel vecino más cercano (nearest neighbour). Se superpusieron datos vectoriales de caminos y red hidrológica a cada fotografía, para llevar a cabo una verificación visual de la corrección geométrica obtenida en cada ortofoto.

Una vez corregidas, y a partir del área útil de cada fotografía, se elaboró el mosaico ortofotográfico del área de estudio, para dar lugar entonces a la actualización de la información cartográfica.

Se utilizaron las coberturas digitales de la vegetación y uso del suelo editadas en 1976 y 1978, y se separaron únicamente los polígonos cuyo tipo de vegetación correspondiera a las áreas arboladas. Los contactos de dicha cobertura fueron sobrepuestos en la ortofotografía y a través de digitalización en monitor se actualizaron los polígonos para cada grado de asociación vegetal de interés.

### 5.3.2. Cuantificación de combustibles forestales

Los combustibles forestales evaluados en la presente investigación correspondieron al tipo de combustibles forestales superficiales muertos y al tipo combustibles forestales terrestres o cama de combustibles.

El criterio empleado para evaluar ambos tipos de combustibles fue la consideración de que los combustibles forestales superficiales muertos son los que inician un incendio forestal, particularmente los combustibles ligeros y los combustibles terrestres.

La técnica empleada para llevar a cabo el inventario de combustibles fue la técnica de intersecciones planares (Van Wagner, 1968; Brown, 1974; Brown *et al.*, 1982).

Esta técnica consiste en la ubicación de una línea de 20 m de longitud cuya dirección fue definida aleatoriamente. Las partículas leñosas intersectadas por la línea cuya clase diamétrica fuese de 0.1 a 2.5 cm de diámetro se registraron durante el primer metro de la línea, las partículas con clase diamétrica de 2.5 a 7.5 cm, se midieron a través de los primeros 4 metros de longitud de la línea, y, finalmente, las partículas con diámetros mayores a 7.5 cm se midieron en la totalidad de la longitud de la línea (figura 6). Los datos registrados fueron el número de intersecciones por categoría diamétrica y el diámetro de cada una de las partículas.

Para el caso de la cama de combustibles forestales, se colectó la hojarasca y materia orgánica contenidos en 1 m<sup>2</sup>, compuesto por 4 cuadrantes de .25 m<sup>2</sup> distribuidos a lo largo de la línea. Cada cuadrante fue pesado *in situ* y finalmente se tomó una submuestra de 300 g para

su posterior secado en el laboratorio. Se registró, además, la profundidad del mantillo a los 5, 10, 15 y 20 metros de longitud de la línea. Se consideró como cama de combustibles a todas aquellas partículas como hojarasca, hojas, conos y ramillas comprendidas desde el suelo hasta la parte superior de la superficie del piso forestal.

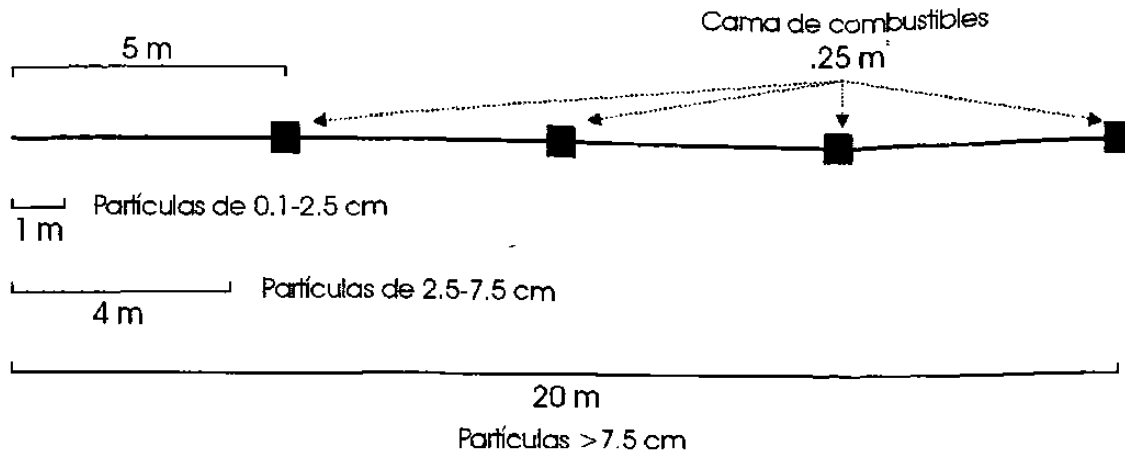


Figura 6. Línea de muestreo para la evaluación de combustibles forestales muertos

Se muestrearon un total de 126 líneas, distribuidas aleatoriamente en los distintos tipos de vegetación de las áreas arboladas en el Ejido Corona del Rosal. El levantamiento de datos fue realizado en los meses de noviembre de 2000 y entre enero y marzo de 2001, con el fin de coleccionar datos durante la estación seca en el área y reunir información sobre combustibles forestales en el transcurso de la época de incendios.

Los tipos de vegetación estudiados sumaron un total de ocho, incluidos el Bosque de *Pinus pseudostrobus*, Bosque de *Pinus pseudostrobus* asociado con chaparral, Chaparral asociado con *Bosque de Pinus pseudostrobus*, Bosque de *Pinus cembroides*, Bosque de *Pinus cembroides* asociado con chaparral, Chaparral asociado con *Bosque de Pinus cembroides*, Bosque de Pino-encino y Bosque de Encino-pino.

La estimación de la carga de combustibles superficiales muertos, se realizó siguiendo los lineamientos propuestos por (Van Wagner, 1982), para lo cual se utilizó la siguiente ecuación:

$$w_1 = \left( G \frac{k}{L} \right) \sum d^2 * c$$

siendo  $w_1$  el peso del material combustible por unidad de superficie;  $d$  el diámetro de la partícula en la intersección,  $L$  la longitud de la línea de muestreo,  $G$  gravedad específica de la madera,  $k$  la constante de transformación de volumen a ton/ha y,  $c$  un factor de corrección por pendiente.

La gravedad específica es la masa (o peso) de un cuerpo dividida entre la masa (o peso) de un volumen igual de agua. Debido a que la densidad del agua a 4°C es igual a 1 gr/cm<sup>3</sup>, el valor numérico de la densidad es exactamente igual al valor de la gravedad específica.

Debido a lo anterior, se emplearon valores de densidad de la madera. El valor de densidad usado para *Pinus pseudostrobus* fue de 0.51 gr/cm<sup>3</sup>, mismo que fue estimado por Cruz de León (1991), para la región. Para *Pinus cembroides* se utilizó el valor de 0.53 gr/cm<sup>3</sup> (Wolf, 1985). En el caso de las especies de *Quercus* se utilizó un valor promedio de densidad de la madera de especies de encinos mexicanos, cuyo valor es 0.85 gr/cm<sup>3</sup> (Fuentes *et al.*, 1996).

Siguiendo los lineamientos propuestos por Van Wagner (1982), el factor  $k$  de constante de transformación de volumen a ton/ha utilizado fue el de 1.234, ya que las unidades en que se registró el diámetro de las partículas fueron centímetros, la longitud de la línea en metros y el peso en ton/ha.



Es necesario convertir el peso por unidad de área de un plano vertical, que implica la pendiente del terreno a una base horizontal. Para ello se empleó el factor  $c$  de corrección por pendiente, calculado a partir de la pendiente registrada en cada uno de los sitios de muestreo medida con una brújula y mediante la siguiente expresión:

$$c = 1 + \left( \frac{\% \text{pendiente}}{100} \right)^2$$

En relación a la cama de combustibles forestales, se secaron las submuestras de 300 g colectadas en campo en una estufa con ventilación forzada a una temperatura de 105 °C hasta obtener peso constante.

Una vez obtenido el peso seco para cada submuestra, se refirió al peso del material colectado como una proporción su peso, de acuerdo con Sánchez, (1983):

$$w_2 = \left[ \left( \frac{P_s * 3.333}{1000} \right) P_i * 10 \right]$$

donde  $w_2$  es la carga de la cama de combustibles expresada en ton/ha,  $P_s$  el peso seco de la submuestra en gramos y,  $P_i$  el peso del material colectado en 1 m<sup>2</sup> expresado en kilogramos.

Una vez calculada la carga de combustibles forestales superficiales y terrestres para cada tipo de vegetación, se procedió a elaborar la cartografía de combustibles forestales, lo cual se logró mediante la asignación de los valores de carga de combustibles a cada uno de los polígonos que comprendían cada uno de los tipos de vegetación actualizada. De esta forma, se elaboraron los mapas de carga de combustibles ligeros, de combustibles pesados, de combustibles terrestres y un mapa de profundidad del piso forestal.

### 5.3.2.1. Análisis digital de la imagen Landsat TM

Con los datos referentes a la carga de combustibles forestales obtenidos en los sitios de muestreo se llevó a cabo un análisis de correlación entre los valores de reflectividad obtenidos con el sensor TM incluido en el satélite Landsat y los valores de carga de combustibles forestales muertos. Se utilizó una subescena de la imagen órbita 27 hilera 43, adquirida en julio de 1998 con una resolución espacial de 30 m.

Como tratamiento previo a la imagen, se realizó la referenciación geográfica y corrección geométrica en el programa ILWIS<sup>®</sup>2.1 for Windows para las bandas espectrales 1, 2, 3, 4, 5 y 7 contenidas en la imagen, para lo cual se distribuyeron 10 puntos de control a partir de cartas topográficas escala 1 : 50,000 correspondientes a la zona de estudio y se obtuvo un error de  $\sigma = 1.2$  píxeles, adecuado para los fines del presente estudio.

Una vez corregida la imagen, se procedió a derivar el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), utilizando el cociente entre las bandas infraroja y roja (bandas 3 y 4) para ser incluido en el análisis. Este cociente se utilizó para mejorar la discriminación entre el suelo y la vegetación y, se basa, de acuerdo con Chuvieco (1990), en el peculiar comportamiento radiométrico entre estas dos cubiertas, ya que la cubierta vegetal húmeda o con mayor cantidad de biomasa muestra un claro contraste en la banda visible correspondiente al rojo y en el infrarojo cercano.

Para llevar a cabo el análisis de correlación, se delimitaron áreas de interés en la imagen TM, alrededor de los sitios de muestreo levantados en campo. A cada área de interés se le extrajo el promedio y la desviación estándar de los valores de reflectividad para cada una de las bandas espectrales utilizadas en el análisis y para cada uno de los tipos de vegetación estudiados.

Finalmente, los promedios obtenidos para las 6 bandas analizadas y el Índice de Vegetación fueron correlacionados con la carga de combustibles forestales muertos mediante el uso del programa STATISTICA<sup>®</sup> versión 4.5.

### 5.3.3. Análisis de variables meteorológicas

Las variables analizadas en esta etapa del estudio fueron la temperatura media máxima y la precipitación pluvial total, ya que tienen una influencia directa con la presencia de incendios forestales. Se eligió la temperatura media máxima porque refleja los valores extremos de la temperatura a diferencia de la temperatura media mensual, y son esos valores extremos superiores los que condicionan la presencia de incendios forestales.

La escala temporal definida para el análisis de las variables meteorológicas fue a nivel mensual, de tal forma que se generaron mapas de temperatura media máxima mensual y de precipitación total promedio mensual.

#### 5.3.3.1. Selección de estaciones climatológicas

Los criterios empleados para elegir a las estaciones climatológicas fueron, en primera instancia, la localización geográfica y el periodo de observaciones contenido en la serie de datos histórica de cada estación.

En función de lo anterior, se eligieron las estaciones ubicadas en una zona climática homogénea, para lo cual se localizaron en el mapa de climas editado por la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, elaborado por García (1998). Las estaciones seleccionadas se muestran en la tabla 2. Esta elección permitió el análisis de datos de estaciones con afinidad climática, reduciendo la variación en los datos y facilitando su procesamiento a través de la interpolación por funciones de regresión. Las estaciones seleccionadas se presentan en el mapa 1.

Una vez elegidas las estaciones climáticas, se estableció un periodo de análisis comprendido de 1978 a 1998. Esto resultó en series de datos con 21 años consecutivos contenidos en las series históricas. La Organización Meteorológica Mundial recomienda series de 30 años para el análisis climático, principalmente para la precipitación, ya que en ese periodo es posible detectar la mayor parte de las variaciones temporales de los elementos del clima. Sin embargo, debido a que en México existen estaciones de reciente establecimiento, se eligió la serie de 21 años por ser la más común en las estaciones empleadas.

Previo a la estimación de variables meteorológicas, se validó la posición geográfica de cada estación, así como su valor de altitud correspondiente, esto último logrado a través de un Modelo Digital de Elevaciones.

Los datos climáticos fueron proporcionados en formato digital por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias (INIFAP) y por la Comisión Nacional del Agua (CNA). Para la recuperación de datos diarios se utilizó el programa de cómputo SICA<sup>®</sup> (Sistema de Información para Caracterizaciones Agroclimáticas), proporcionado por el INIFAP.

Tabla 2. Estaciones climatológicas empleadas

ESTACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTITUD
ARAMBERRI	24° 06' 11"	99° 49' 06"	1095
CIENEGA DEL TORO	25° 05' 05"	100° 20' 00"	2181
EL POTOSI	24° 50' 36"	100° 19' 15"	1898
ITURBIDE	24° 43' 31"	99° 54' 17"	1475
LAS PRESAS	24° 18' 44"	100° 01' 55"	1851
MIMBRES	24° 58' 26"	100° 15' 31"	2303
SAN JOSE DE RAICES	24° 34' 00"	100° 14' 18"	1883
EL RUCIO	24° 41' 47"	100° 26' 31"	1981
GALEANA	24° 49' 12"	100° 04' 46"	1629
EL REF DE LOS IBARRA	24° 26' 28"	100° 21' 26"	1824
ZARAGOZA	23° 58' 55"	99° 46' 50"	1381
PABLILLO	24° 35' 39"	99° 59' 49"	2087
SAN J DE RESENDIZ	24° 16' 06"	99° 51' 30"	1996
LA ASENCION	24° 19' 22"	99° 54' 37"	1989
SAN FCO DE BERLANGA	24° 21' 56"	100° 6' 49"	1889
SAN JORGE	24° 34' 41"	100° 26' 49"	1896
CIENEGUITAS Y CRUCITAS	24° 34' 04"	99° 58' 47"	2500
EJ 18 DE MARZO	24° 53' 19"	100° 10' 47"	2034
LA POZA	24° 42' 57"	100° 00' 57"	1760

La siguiente fase del análisis fue la estimación de datos faltantes dentro de las series históricas. Los valores de temperatura media máxima mensual se estimaron en función de la altitud (Villalpando y García, 1993). Los datos de precipitación fueron estimados mediante el análisis de correlación entre estaciones climáticas de acuerdo con lo propuesto por Aparicio (1999). Los coeficientes de correlación aceptados para estas estimaciones oscilaron entre .75 y .96.

### 5.3.3.2. Construcción de Modelos de Regresión lineal

Una vez completadas las series de datos para el periodo de estudio, se procedió a la construcción de modelos de regresión lineal.

Las variables que potencialmente formarían parte de los modelos de regresión fueron seleccionadas a partir de un análisis univariable, a través de un análisis de correlación para cada variable independiente. Las variables elegidas fueron la altitud, latitud y longitud.

Para el caso de la temperatura media máxima, se empleó la forma simple de una función de regresión lineal, por medio de la cual, se estimó el valor de temperatura en función de la altitud, considerando el inminente protagonismo de ésta con respecto a la temperatura.

$$T_{\max} f(z),$$

Siendo la función de regresión:

$$y = a + b(x),$$

entonces,

$$T_{\max} = a + b(z),$$

donde  $T_{\max}$  es la temperatura media máxima del mes bajo estudio ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $z$  la altitud sobre el nivel medio del mar y  $a$  y  $b$  los parámetros de la regresión

La precipitación total promedio mensual fue estimada a través de un modelo de regresión múltiple, considerando como variables independientes la altitud, latitud y la longitud:

$$Pt_{\text{mensual}} = f(z, x, y)$$

$$y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_3y_3,$$

entonces,

$$Pt_{\text{mensual}} = \beta_0 + \beta_1z_1 + \beta_2x_2 + \beta_3y_3$$

siendo  $Pt_{\text{mensual}}$  la precipitación total promedio del mes bajo estudio (mm),  $z$  la altitud sobre el nivel medio del mar,  $x$  la longitud expresada en unidades métricas,  $y$  la latitud expresada en unidades métricas y  $\beta_0$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  y  $\beta_3$  los parámetros de la regresión.

Para la elaboración de la cartografía de las variables meteorológicas, se construyeron matrices de datos con los valores respectivos de altitud, latitud y longitud en el programa Idrisi32<sup>®</sup>, las cuales constituyeron las variables independientes para la estimación, y que fueron multiplicadas por los parámetros correspondientes generados mediante el análisis de regresión.

Se generaron un total de 24 mapas, correspondiendo cada uno a las variables temperatura media máxima y precipitación total para cada mes del año y para la superficie ocupada por el Ejido Corona del Rosal. Para el análisis final, cada mapa fue cortado para obtener cartografía de las áreas arboladas dentro del Ejido.

### 5.3.4. Generación de Modelos Digitales del Terreno

Las variables topográficas seleccionadas para el análisis fueron la altitud sobre el nivel del mar y la orientación de la pendiente o aspecto. Estas variables fueron consideradas como criterios de evaluación del Peligro de Incendios, para ambos casos como expresiones de la relación entre la temperatura y humedad en el terreno.

El Modelo Digital de Aspecto fue generado a partir de los Modelos Digitales de Elevaciones (MDE) editados por el INEGI, correspondientes a las cartas escala 1 : 250,000 G-14-10 y G-14-11, con una resolución espacial de 90 metros.

El formato original de ambos Modelos Digitales de Elevación era binario sin encabezado de 16 bits y fueron importados desde el programa Idrisi32<sup>®</sup> para su procesamiento.

A través del módulo *Surface analysis* incluido en Idrisi32<sup>®</sup> se calcularon los valores de cada una de las variables topográficas bajo análisis para dar lugar al mapa de aspecto.

El Modelo Digital de Elevaciones fue empleado como variable independiente para la estimación de la temperatura media máxima y la precipitación total promedio. Por su parte, el Modelo Digital de Aspecto fue clasificado considerando los cuatro puntos cardinales y sus valores intermedios, relacionados con la variabilidad espacial de la temperatura y la humedad del ambiente. El resultado fue un mapa categórico conteniendo polígonos por cada clase de orientación de pendientes.

Una vez generado el mapa de aspecto, fue cortado con los límites de las áreas arboladas para su análisis final.

### 5.3.5. Evaluación de variables socioeconómicas

Debido a la dificultad de representar espacialmente el riesgo de incendios dado por las actividades humanas, y en virtud de la importancia de su integración en el modelo, se recurrió al análisis de ciertas variables económicas y sociales que permitieran evaluar indirectamente el riesgo.

En el caso de factores económicos, fueron consideradas las áreas sometidas al manejo forestal, y que representan por sí mismas, una actividad económica. La distancia a las brechas de corta, y a las veredas fueron considerados como elementos relacionados principalmente con la presencia de personal en las actividades de corta y extracción de madera. La distancia a los poblados fue evaluada en función de un área en donde los pobladores realizan sus actividades cotidianas, y, por último, la distancia a la carretera fue evaluada desde la óptica de la presencia humana que puede tener una influencia sobre el bosque.

El proceso para la evaluación de estos rasgos geográficos consistió en la digitalización de la red de caminos dentro del Ejido y aquellos caminos colindantes con el mismo. La digitalización se llevó a cabo en el programa ILWIS<sup>®</sup>2.1 for Windows<sup>®</sup>, en donde se les asignó un identificador que permitiera la distinción entre los distintos tipos de vías de acceso. Se digitalizaron, además, las poblaciones, que se extrajeron de las cartas topográficas, y por último, los polígonos de los rodales comerciales se digitalizaron a partir de cartografía forestal proporcionada por la Unidad de Conservación y Desarrollo Forestal No. 1, Galeana.

Para el caso de las vías de acceso y poblados, se llevó a cabo un análisis de distancia, mismo que fue desarrollado en el módulo *distance*, incluido en el programa Idrisi32<sup>®</sup>. Se establecieron como distancias de mayor riesgo, para el caso de las brechas de extracción de madera 50 metros, definidos en función de observaciones en campo; para el caso de las veredas 20 m y para la carretera una distancia de 50 metros. La distancia definida con relación a los poblados fue de 500 metros, determinados en función de que los pobladores suelen desarrollar actividades agropecuarias dentro de este radio de distancia.



### 5.3.6. Evaluación de los criterios seleccionados

Los criterios cantidad y tipo de combustibles forestales, temperatura media máxima, precipitación total promedio, orientación de las pendientes y los elementos socioeconómicos fueron seleccionados a partir de revisiones bibliográficas, la consulta a expertos así como observaciones personales.

La integración de los criterios para derivar Índices de Peligro de Incendios Forestales y representarlos cartográficamente fue realizada en términos de una Evaluación Multi Criterio (EMC).

La forma de evaluación de los criterios o atributos fue llevada a cabo a través de combinación lineal ponderada con una fase de jerarquización de criterios mediante el uso del programa Idrisi32®.

#### 5.3.6.1. Estandarización de las dimensiones de los criterios

Debido a la diferencia dimensional en las unidades en que fueron medidos cada uno de los criterios, fue necesario, como primera fase dentro de la EMC, estandarizar dichas unidades a un rango numérico común para poder ser comparadas y referidas en una escala única. Dicha estandarización fue llevada a cabo en el módulo *decision support*.

Para el caso del complejo de combustibles forestales, y para cada mapa (carga de combustibles ligeros, pesados, cama de combustibles y profundidad del mantillo), se asignó un valor dentro de la escala *byte*, de 0 a 255, correspondiendo el valor 255 a la mayor carga de combustibles por hectárea, y el 0 a la ausencia de combustibles forestales, de tal forma que a los máximos valores de carga les fue asignando el valor de 255 y conforme el valor de carga disminuyera, el valor asignado en la escala *byte*, disminuía también.

Lo anterior significa que en cuanto mayor sea el valor (entre 0 y 255), mayor será el valor de la alternativa asignada, para este caso, mayor será el Peligro de Incendios.

La naturaleza de la continuidad espacial de las variables temperatura media máxima y precipitación total promedio, condujo a la utilización del comando *fuzzy*, en donde se considera en primera instancia la naturaleza de dicha continuidad. Se utilizó una relación lineal partiendo de que en general, a mayor incremento en el valor de temperatura, mayor será el valor de la alternativa, de igual forma para la precipitación, aunque de modo inverso, es decir, a mayor valor de precipitación, menor será el valor de la alternativa.

El criterio base para definir los valores *byte* mínimos y máximos de temperatura y precipitación se basó en el análisis del periodo seco en el área de estudio, de tal forma que, para el caso de temperatura, la asignación del valor *byte* en la estandarización se consideró el valor promedio mensual esperado, como mínimo, mientras que el valor máximo se obtuvo del mapa de temperatura máxima para cada mes.

La precipitación fue estandarizada de la misma forma, en función del valor promedio mensual esperado y el valor máximo de lluvia para el mes en cuestión.

La base de este enfoque fue la consideración de que los incendios forestales normalmente se presentan bajo las condiciones promedio de temperatura y precipitación dados para cada mes.

Esta forma de analizar las variables meteorológicas permitió tomar como límites de temperatura y precipitación aquellos representados por los valores medios, de manera que al aumentar la cantidad de lluvia esperada para cada mes, el nivel de peligro tiende a disminuir, y viceversa. Para el caso de la temperatura, si el valor de cada pixel era mayor al del valor de temperatura esperada, el grado de peligro aumentaría.

La expresión utilizada por Idrisi32<sup>®</sup> para la estandarización de los valores continuos es la siguiente:

$$x_i = \frac{R_i - R_{\min}}{R_{\max} - R_{\min}}$$

donde  $x_i$  es el valor estandarizado;  $R$  el valor sin transformar de cada pixel

La estandarización de las clases de orientación de pendientes fueron asignados por el evaluador, debido al carácter categórico de los datos. En la tabla 3 se presentan los valores estandarizados para cada una de las orientaciones. La asignación de estos valores obedeció a las variaciones espaciales de temperatura y humedad que se manifiestan en función de la orientación de la pendiente. Los valores extremos en esta variación se presentan en las exposiciones sur y norte, mientras que las orientaciones restantes poseen condiciones intermedias entre ambos extremos.

Tabla 3. Valores estandarizados para cada clase de orientación de pendientes

Clase	Valor estandarizado
Norte	50
Noreste	75
Este	100
Sureste	150
Sur	250
Suroeste	200
Oeste	100
Noroeste	25

Los valores estandarizados para la distancia a las vías de acceso y la cercanía a poblados, fueron generados con el comando *fuzzy*, considerando una relación lineal inversa que parte del razonamiento de que, a menor distancia mayor será el valor de la alternativa para el criterio. Debido a la naturaleza continua de la distancia y a las áreas de influencia mencionadas anteriormente para cada una de las vías de acceso y a poblados, se introdujeron como puntos de referencia requeridos por el comando *fuzzy* como valores mínimos 0 y como valores máximos, 50 m para las brechas de corta así como para las carreteras, 20 m para el caso de las veredas y 500 m con respecto a la cercanía a poblados.

**5.3.6.2. Asignación de valores de importancia a los criterios**

En el esquema de la EMC, existe la consideración de que no todos los criterios a evaluar poseen el mismo grado de influencia en la solución del problema espacial planteado.

Para este estudio se obtuvieron 3 componentes o subíndices de Peligro (ver figura 7), para dar lugar, finalmente, a un Índice de Peligro de Incendios que contemplara todos los factores bajo análisis. Fue necesario, entonces generar en primera instancia cada uno de los subíndices de Combustibles Forestales, Meteorológico y el de Causa.

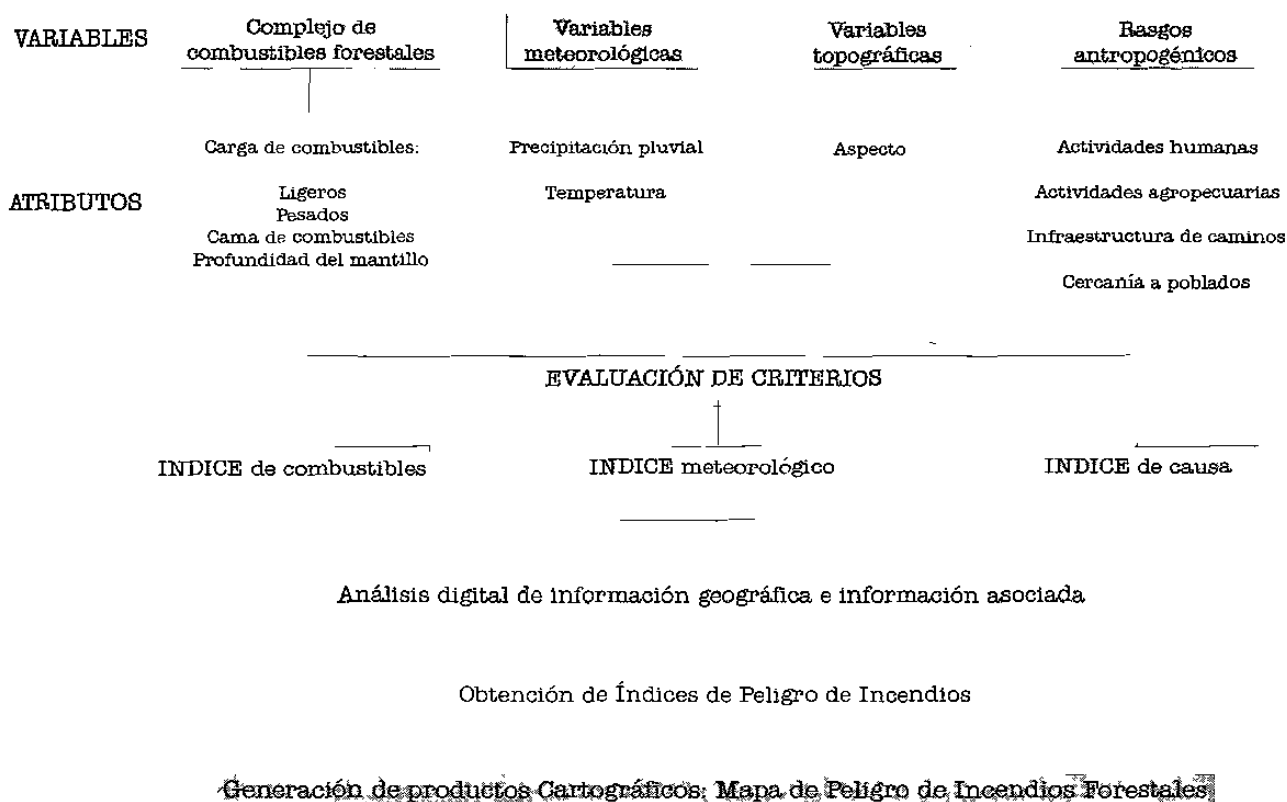


Figura 7. Esquema del Modelo Espacial de Peligro de Incendios Forestales propuesto

La asignación de los valores relativos de importancia para cada uno de los atributos espaciales fue llevada a cabo a través de la construcción de una matriz de comparación de criterios, considerada dentro del método de evaluación de criterios por pares (*pairwise*). Dicha matriz evalúa el nivel de importancia para cada uno de los atributos en relación con los criterios restantes considerados. La estructura de la matriz de comparación se muestra en la tabla 4. Puede observarse que se establece una comparación de los criterios entre sí, y las puntuaciones son asignadas con base en una escala de comparación (tabla 5).

Tabla 4. Matriz de comparación de criterios

	<i>criterio 1</i>	<i>criterio 2</i>	<i>criterio n</i>
<i>criterio 1</i>	$X_{11}$	$X_{12}$	$X_{1n}$
<i>criterio 2</i>	$X_{21}$	$X_{22}$	$X_{2n}$
<i>criterio m</i>	$X_{m1}$	$X_{m2}$	$X_{mn}$

Tabla 5. Escala de valores relativos de importancia

1/9	1/7	1/5	1/3	1	3	5	7	9
extremo	muy fuerte	fuerte	moderado	igual	moderado	fuerte	muy fuerte	extremo
<i>menor importancia</i>				<i>mayor importancia</i>				

Las matrices de comparación fueron llenadas asignando entonces, una puntuación al criterio en el sentido de las filas de la matriz comparado con cada uno de los atributos representados por cada columna. En las tablas 6, 7 y 8 se muestran las puntuaciones asignadas a cada atributo para cada componente o subíndice de Peligro de Incendios.

Tabla 6. Puntuaciones de los atributos del Índice de Combustibles Forestales

	<i>Cama de combustibles</i>	<i>Combustibles ligeros</i>	<i>Combustibles pesados</i>	<i>Profundidad del mantillo</i>
<i>Cama de combustibles</i>	1	1	5	1
<i>Combustibles ligeros</i>	1	1	5	1/2
<i>Combustibles pesados</i>	1/5	1/5	1	1/5
<i>Profundidad del mantillo</i>	1	2	5	1

Se consideró una mayor puntuación a los atributos que representaban a los combustibles ligeros y a la cama de combustibles, ya que este tipo de combustibles determina mayormente la ocurrencia de incendios.

Tabla 7. Puntuaciones de los atributos del Índice Meteorológico

	<i>Temperatura máxima</i>	<i>Precipitación total</i>	<i>Aspecto</i>
<i>Temperatura máxima</i>	1	1/3	2
<i>Precipitación total</i>	3	1	3
<i>Aspecto</i>	1/2	1/3	1

Dado que la precipitación puede considerarse como un factor que influye de forma más directa en el Peligro de Incendios que la temperatura, desde el punto de vista que la mayor cantidad de precipitación puede causar la ausencia de incendios, principalmente en la época lluviosa, le fue asignada la puntuación más elevada.

Con respecto al Índice de Causa, las puntuaciones más elevadas fueron asignadas a los atributos que representan la influencia humana en las áreas forestales a través de actividades que implica el aprovechamiento forestal. En este sentido, los rodales comerciales y las brechas de extracción de madera obtuvieron las mayores puntuaciones.

Tabla 8. Puntuaciones de los atributos del Índice de Causa

	<i>Áreas de aprovechamiento</i>	<i>Distancia a brechas</i>	<i>Distancia a carreteras</i>	<i>Distancia a veredas</i>	<i>Distancia a poblados</i>
<i>Áreas de aprovechamiento</i>	1	2	7	3	5
<i>Distancia a brechas</i>	1/2	1	7	5	5
<i>Distancia a carreteras</i>	1/7	1/7	1	1	1/3
<i>Distancia a veredas</i>	1/3	1/5	1	1	1/3
<i>Distancia a poblados</i>	1/5	1/5	3	3	1

El proceso de generación de los valores de importancia para cada atributo, designados a partir del análisis de la matriz de comparación se llevó a cabo mediante la suma de valores para cada una de las columnas, luego se dividieron cada uno de los elementos de la matriz por la suma total de su columna correspondiente, resultando una matriz de comparación normalizada. Por último, se obtuvo un promedio de los elementos para cada fila mediante la suma de los valores normalizados dividido por el número de atributos empleados en la comparación. El resultado fue un valor de importancia relativa, que debe ser interpretado como el promedio de todas las posibilidades de comparación entre los criterios.

Una vez obtenidos los valores de importancia, se calculó el índice de consistencia, que indica la probabilidad de que los valores fueron generados al azar. Se considera que un valor de este índice menor de 0.10 (Malczewski, 1999; Eastman,1999) refleja un nivel de consistencia razonable en las comparaciones.

Los valores de importancia para cada componente del Índice de Peligro de Incendios se calcularon a través del uso de la función *weight*, dentro del módulo *decision support* en el programa Idrisi32®.

Para generar los subíndices, se utilizó la variante de jerarquización del método lineal ponderado, cuya expresión es:

$$r_i = \sum_{j=1}^n w_j x_{ij}$$

donde  $r_i$  es el índice o mapa objetivo,  $w_j$  valor de importancia del criterio  $j$  y  $x_{ij}$  el valor de la alternativa  $i$  del criterio  $j$

En este sentido, a cada pixel del subíndice en cuestión le fue asignado un valor que fue obtenido a partir de la sumatoria del producto del valor relativo de importancia generado por la matriz de comparación, por el valor estandarizado en los pixeles de cada subíndice, obtenidos de los mapas estandarizados. Cabe destacar en este momento el proceso de jerarquización de los criterios. Aún que el valor de importancia para cada atributo fue dado a partir de un enfoque en donde el mayor valor le fue asignado al atributo que más influencia tuviese en el Peligro de Incendios, la jerarquización permitió ordenar nuevamente los criterios, con el fin de manipular el nivel de Peligro en función de la importancia de los atributos sobre dicho nivel. Lo anterior da lugar a la obtención de mapas sobre cada uno de los subíndices en donde el Peligro de Incendios está representado principalmente por el criterio de mayor orden.

Finalmente, se aplicó nuevamente la ecuación del método lineal con jerarquía, pero esta vez, integrando los tres subíndices generados con anterioridad, dando como resultado 12 mapas de Índices de Peligro de Incendios, uno para cada mes del año. El orden jerárquico se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 9. Orden de los criterios para la generación del Índice de Peligro de Incendios

<i>Primer Orden</i>	<i>Segundo Orden</i>	<i>Tercer Orden</i>
Índice Meteorológico	Índice de Combustibles	Índice de Causa



Los mapas fueron clasificados en cinco clases de Peligro de Incendios, mismas que se muestran en la tabla 10. Dicha clasificación obedeció a los valores mínimos y máximos que puede alcanzar el Índice de Peligro de Incendios para cada mes.

---

Tabla 10. Clasificación del Peligro de Incendios Forestales

<b>Grado de Peligro de Incendios</b>
Muy bajo
Bajo
Medio
Alto
Muy Alto
Extremo

## 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 6.1. ACTUALIZACIÓN CARTOGRÁFICA

Como producto final de la creación de ortofotografías digitales, se obtuvo un mapa de ocupación del suelo en el Ejido Corona del Rosal.

Del mapa de ocupación actualizado se extrajeron los polígonos conteniendo las áreas arboladas del Ejido, cuyas superficies se presentan en el cuadro 1. La distribución de las áreas arboladas se muestra en el mapa 2 del anexo cartográfico.

Cuadro 1. Superficie de las áreas arboladas bajo estudio en el Ejido Corona del Rosal

<b>Tipo de vegetación</b>	<b>Superficie (ha)</b>
Bosque de <i>Pinus pseudostrobus</i>	254.03
Bosque de <i>Pinus pseudostrobus</i> asociado con chaparral	489.71
Chaparral asociado con Bosque de <i>Pinus pseudostrobus</i>	226.38
Bosque de <i>Pinus cembroides</i>	401.34
Bosque de <i>Pinus cembroides</i> asociado con chaparral	417.54
Chaparral asociado con Bosque de <i>Pinus cembroides</i>	201.86
Bosque de pino-encino	503.01
Bosque de encino-pino	992.48
<b>Total</b>	<b>3486.35</b>

Las superficies fueron obtenidas a partir de la generación del histograma del mapa de polígonos de vegetación, lo que aseguró un grado de exactitud elevado en comparación con las técnicas de planimetría manuales.

Estos polígonos actualizados constituyeron en sí la base para definir el área de estudio para su posterior análisis espacial.

## 6.2. CARACTERIZACIÓN DEL COMPLEJO DE COMBUSTIBLES FORESTALES MUERTOS

Como se mencionó anteriormente, se distribuyeron puntos de muestreo al azar en cada uno de los tipos de vegetación bajo estudio para la evaluación de los combustibles forestales.

Del análisis de los datos levantados en campo, se estimó la carga de combustibles forestales muertos para cada una de las áreas arboladas. Los resultados obtenidos se presentan en el cuadro 2, expresando la carga de combustibles ligeros y pesados en ton/ha; la carga total se refiere únicamente al total de los combustibles leñosos; la carga de la cama de combustibles es expresada en ton/ha y la profundidad fue expresada en cm.

Los tipos de vegetación en donde se encontró la mayor carga total de combustibles leñosos fueron el Bosque de *Pinus pseudostrabus*, seguido por bosques de pino-encino, Bosque de *Pinus pseudostrabus* asociado con chaparral y los bosques de pino-encino. Estos tipos de vegetación son los que se encuentran sujetos a aprovechamiento maderable, ya que la especie de mayor interés es *P. pseudostrabus*, presente en todas las áreas mencionadas. Estos valores superiores de carga, son el resultado de residuos de corta, principalmente, en comparación con los bosques de *P. cembroides*. en donde, a pesar de que sí se lleva a cabo aprovechamiento forestal, se realiza con una intensidad menor, debido a que las características de esta especie no son comerciales.

Por otra parte, el análisis de la carga de combustibles pesados, arroja los valores más altos para los bosques de *P. pseudostrabus*, bosques de pino-encino y bosques de *P. pseudostrabus* asociado con chaparral, correspondiendo a zonas de aprovechamiento forestal. Los resultados obtenidos son relativamente bajos en función de los resultados obtenidos en otras áreas. En el año 2000, Alanís y Orozco estimaron cargas de combustibles pesados con valores entre 13 y 42 ton/ha; Flores y Benavides (1994), estimaron entre 13 y 53 ton/ha de combustibles pesados. Sin embargo, los estudios citados fueron realizados en zonas con una gran intensidad de aprovechamiento forestal (Chihuahua y Jalisco), lo que explica las cantidades altas de material combustible pesado.

Cuadro 2. Carga de combustibles forestales y valores estadísticos descriptores

Tipo de vegetación	Cama de				
	Ligeros	Pesados	Total	combustibles	Profundidad
<b>Bosque de Pinus pseudostrobus</b>					
<i>Promedio</i>	7.90	17.85	25.75	11.06	3.05
<i>Error estándar</i>	2.32	4.61	5.99	0.74	0.25
<i>Desviación estándar</i>	10.11	20.11	26.11	3.22	1.07
<i>Coefficiente de variación</i>	128.00	112.68	101.41	29.15	35.24
<b>Bosque de Pinus pseudostrobus asociado con chaparral</b>					
<i>Promedio</i>	6.52	11.11	17.63	10.23	3.02
<i>Error estándar</i>	1.55	3.47	3.50	1.15	0.38
<i>Desviación estándar</i>	6.93	15.52	15.64	4.60	1.72
<i>Coefficiente de variación</i>	106.28	139.63	88.70	44.93	57.06
<b>Chaparral asociado con Bosque de Pinus pseudostrobus</b>					
<i>Promedio</i>	4.12	7.26	11.38	16.25	3.79
<i>Error estándar</i>	1.62	5.85	5.59	1.26	0.39
<i>Desviación estándar</i>	5.37	19.39	18.54	4.18	1.29
<i>Coefficiente de variación</i>	130.37	267.23	162.98	25.74	33.97
<b>Bosque de Pinus cembroides</b>					
<i>Promedio</i>	3.80	0.88	4.68	11.03	2.12
<i>Error estándar</i>	0.93	0.62	1.05	0.91	0.18
<i>Desviación estándar</i>	4.24	2.85	4.79	4.07	0.80
<i>Coefficiente de variación</i>	111.56	323.40	102.31	36.92	37.77
<b>Bosque de Pinus cembroides asociado con chaparral</b>					
<i>Promedio</i>	6.00	3.31	9.30	13.83	2.31
<i>Error estándar</i>	1.53	1.78	3.08	2.21	0.45
<i>Desviación estándar</i>	4.59	5.34	9.24	6.64	1.36
<i>Coefficiente de variación</i>	76.50	161.69	99.33	47.98	59.05
<b>Chaparral asociado con Bosque de Pinus cembroides</b>					
<i>Promedio</i>	3.54	0.50	4.03	14.01	2.98
<i>Error estándar</i>	1.04	0.33	1.04	1.15	0.58
<i>Desviación estándar</i>	2.95	0.92	2.94	3.04	1.64
<i>Coefficiente de variación</i>	83.50	185.17	72.85	21.72	55.08
<b>Bosque de pino-encino</b>					
<i>Promedio</i>	5.16	15.02	20.18	11.53	2.88
<i>Error estándar</i>	1.28	7.36	7.57	1.10	0.27
<i>Desviación estándar</i>	5.44	31.22	32.12	4.55	1.14
<i>Coefficiente de variación</i>	105.44	207.87	159.16	39.45	39.49
<b>Bosque de encino-pino</b>					
<i>Promedio</i>	6.41	8.19	14.61	12.83	3.00
<i>Error estándar</i>	1.97	3.18	4.39	0.77	0.52
<i>Desviación estándar</i>	8.82	14.20	19.64	3.15	2.32
<i>Coefficiente de variación</i>	137.59	173.27	134.43	24.59	77.42

Resulta importante discutir sobre la variabilidad alta que se encontró en los combustibles forestales pesados. Debido a que el método de muestreo considera el número de intersecciones a lo largo de la línea de 20 m de longitud, la variabilidad está entonces en función del número de partículas que intersectan la línea, y, debido a que en ocasiones las trozas de madera son dejadas en el rodal, ocasionó que el número de partículas con diámetros mayores a 7.5 cm de diámetro intersectadas por la línea fueran escasas. A menor número de partículas intersectadas, mayor será la variabilidad. Alvarado (1986), reporta valores de coeficientes de variación para combustibles pesados de hasta 220.4 % en rodales poco perturbados de *Pinus montezumae*. Lo anterior puede ser observado, para el caso del presente estudio en los rodales con baja intensidad de aprovechamiento, como es el caso de áreas de *P. cembroides*, en donde se obtuvieron los mayores coeficientes de variación, ya que en estas áreas son realmente esporádicas las trozas derribadas, y fueron encontradas únicamente en zonas abiertas con poca pendiente y fáciles de intervenir. Lo anterior puede ser también corroborado con los valores bajos de carga de combustibles pesados en rodales de *P. cembroides* y en el Chaparral asociado con *P. pseudostrobus*, así como en el tipo de Chaparral asociado con *P. cembroides*.

Con respecto a la carga de combustibles ligeros, el comportamiento es muy similar al de los combustibles pesados, encontrándose la mayor carga en rodales bajo aprovechamiento maderable, producto del desrame de trozas en los sitios de corta. La variabilidad para este tipo de combustibles reportada por Brown (1982), alcanza valores de 102 % en el coeficiente de variación. Por su parte, Alvarado (1986), reporta valores alrededor del 80 % en rodales con poca perturbación.

Los valores más elevados de carga de la cama de combustibles fueron encontrados en los tipos de vegetación en donde estaba presente el chaparral de encinos, explicado por la gran cantidad de hojas y ramillas desprendidas de los arbustos debido a lo denso de su follaje.

Puede observarse, también, que para la cama de combustibles se encontraron los valores más bajos en los coeficientes de variación, ya que la caída de las hojas en árboles y arbustos está gobernada principalmente por factores naturales como la especie y el estado fisiológico. Los valores de profundidad promedio más bajos correspondieron a los bosques de *P. cembroides*, debido principalmente al tamaño y la cantidad de las acículas, impidiendo que se

acumule una gran cantidad de ellas en el piso forestal comparado con los bosques de *P. pseudostrobus*.

Lo anterior supone que a mayor intensidad de manejo, mayor será la variabilidad en los combustibles forestales, debido a que los factores que inciden en ellos poseen un carácter aleatorio, es decir, influye la dirección en que son derribados los árboles, el desrame, el tamaño final del picado de ramas, y la alteración del piso forestal ocasionada por el derribo y arrastre de trozas, entre otros.

#### **6.2.1. Relación entre la carga de combustibles forestales y los valores de reflectividad obtenidos de la imagen TM**

Una de las hipótesis planteadas para este estudio, fue que la carga de combustibles guardaba una fuerte correlación con los valores de reflectividad de una imagen TM.

Los valores más altos de correlación fueron obtenidos de las bandas 4 y 5, correspondientes al infrarrojo cercano e infrarrojo medio (cuadro 3). Estas bandas están relacionadas con el contenido de humedad en la vegetación y la cantidad de biomasa vegetal en el terreno, lo que en primera instancia podría explicar en parte su relación con la cantidad de combustibles forestales.

Sin embargo, y debido a que las variables de interés se encuentran sobre la superficie terrestre, el dosel representa un obstáculo que impide una visibilidad adecuada para observar la superficie del suelo, y los valores de reflectividad manifiestan entonces la reflectividad de la vegetación. Por otra parte, las sombras en la imagen ocasionadas por efecto del relieve del terreno, dan como resultado valores de reflectividad distintos a los que poseen realmente la vegetación y el suelo.

Cuadro 3. Valores del coeficiente de correlación entre los tipos de combustibles forestales muertos y las bandas 4 y 5 de la imagen Landsat TM

	Banda 4	Banda 5
<b>Carga Total de combustibles forestales muertos</b>	.71	.64
<b>Carga Total de combustibles leñosos</b>	.69	.61
<b>Carga total de combustibles pesados</b>	.69	.59

La carga total de combustibles forestales muertos es igual a la suma de combustibles ligeros + combustibles pesados + cama de combustibles; la carga total de combustibles leñosos se refiere a los combustibles ligeros y a los combustibles pesados.

Se considera, entonces, que los valores derivados del análisis de correlación son altos tomando en cuenta los factores de restricción antes mencionados y considerando, además, que se trata de una forma indirecta de estimación de la carga de combustibles forestales.

### 6.3. VARIABLES METEOROLÓGICAS

En lo que concierne al análisis de las variables meteorológicas, y, específicamente a los resultados obtenidos de la construcción de las funciones de regresión, cabe señalar que, en general, los resultados son alentadores tomando en cuenta que las variables estudiadas están influenciadas por una serie de factores de los que no se cuenta con datos.

La temperatura máxima, además de guardar un nivel de dependencia considerable con la altitud, se relaciona con la insolación, que representa uno de los factores que más influye para que la temperatura alcance sus valores máximos. La insolación podría incorporarse en el modelo de estimación de temperatura máxima a través de la exposición y la pendiente; sin embargo, en México, como en otras muchas partes del mundo, las estaciones climatológicas se establecen con un criterio de producción agropecuaria, por lo que se instalan en sitios cercanos a las áreas agrícolas, sin pendiente y por lo tanto, sin exposición, lo que dificulta la obtención de datos de temperatura considerando la insolación.

Otro de los factores que se relacionan con la temperatura es la latitud, que para el caso del presente estudio, también presentó una relación con la temperatura media máxima en el análisis univariable, sin embargo, cuando se incorporó al modelo se encontró que la aportación de información hacia el modelo era mínima, por lo que se decidió llevar a cabo las estimaciones en función de la altitud, cuya aportación de información al modelo fue significativa al 95 %.

Además de la inconveniencia de incorporar las variables insolación y latitud al modelo para este caso específico, existió otro factor limitante, y se trata del número de observaciones, dado por el bajo número y la pobre distribución espacial de las estaciones climatológicas en el estado (ver mapa de distribución de estaciones climatológicas en el anexo cartográfico).

Lo anterior no es exclusivo para la variable temperatura máxima, sino también para la precipitación pluvial. Si se hubiese contado con información proveniente de un mayor número de estaciones, es posible que con las variables empleadas se hubiera obtenido un grado mayor de explicación de las variables temperatura media máxima y precipitación.

En el cuadro 4 se muestran los factores considerados para la evaluación del modelo de regresión simple para la temperatura máxima, así como los parámetros resultantes de la regresión. Los mejores estimadores se obtuvieron, en general, para los meses más cálidos, comprendidos en el periodo de abril a agosto.

Puede observarse, además, la gran dependencia entre la temperatura máxima y la altitud, aunque en algunos casos se explica poco menos del 60 % de la variabilidad de la temperatura máxima. Sin embargo, mediante el uso de este modelo, se logran estimaciones comprendidas dentro de un 10% de error con respecto al valor promedio mensual.

La figura 8 muestra la superficie obtenida a partir del mapa de temperaturas medias máximas a nivel mensual, calculado con la función de regresión propuesta. Para los meses más calurosos, la mayor superficie del Ejido corresponde a la clase de 20 a 25 °C, alcanzándose los valores más altos en los meses de mayo, junio, julio y agosto. Para el periodo de enero a abril, meses en donde suele ocurrir la mayor incidencia de incendios forestales, en la mayor superficie arbolada, la temperatura media máxima oscila entre los 15 y 25 °C.



Cuadro 4. Resumen del modelo de regresión lineal simple siendo la temperatura media máxima mensual la variable dependiente y la altitud sobre el nivel del mar la variable independiente

Mes	r	r <sup>2</sup>	Error estándar de la estimación	a	b
ENERO	.76	.58	1.69	30.81832157	-0.005966751
FEBRERO	.77	.59	1.78	33.38704831	-0.00638513
MARZO	.79	.62	1.79	36.71166067	-0.006895684
ABRIL	.80	.64	1.71	38.52252634	-0.00685643
MAYO	.79	.62	1.66	39.43160039	-0.006387822
JUNIO	.79	.63	1.64	39.37811811	-0.006416703
JULIO	.83	.69	1.47	39.11676405	-0.006553821
AGOSTO	.82	.68	1.43	38.08471796	-0.006228803
SEPTIEMBRE	.75	.56	1.61	35.54162023	-0.005517958
OCTUBRE	.78	.62	1.56	35.15084626	-0.005962016
NOVIEMBRE	.77	.59	1.46	32.42724124	-0.005262022
DICIEMBRE	.81	.66	1.54	32.90166091	-0.006400774

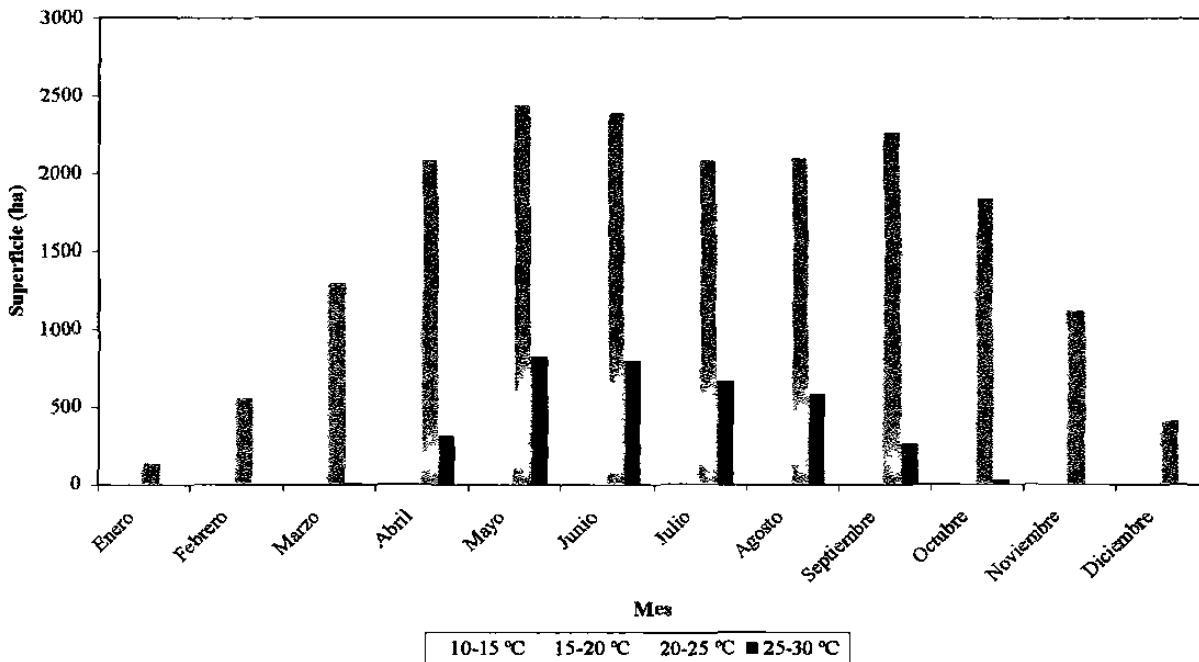


Figura 8. Superficies obtenidas a partir del mapa de temperatura media máxima mensual

Para la interpolación espacial de la precipitación total promedio mensual se utilizaron como variables independientes la altitud, latitud y longitud. El resumen del análisis de regresión lineal múltiple se muestra en el cuadro 5.

Es sabido que la altitud sobre el nivel del mar tiene gran influencia sobre la cantidad de lluvia, especialmente de tipo orográficas. Este fenómeno puede ser explicado por la presencia de una barrera de montañas, en donde el aire asciende, se enfría y entonces produce lluvia, de tal forma que donde se presenta la mayor cantidad de precipitación es aquella zona más cercana al nivel de condensación, es decir, las áreas con mayor altitud. El efecto de la latitud se relaciona con la distancia entre el punto donde se produce la lluvia y el Ecuador. En general, se considera que los puntos más cercanos al Ecuador presentarán una cantidad de precipitación superior que aquellos más lejanos. Por su parte, la longitud, puede ser considerada una variable que representa, hasta cierto punto, la distancia al mar, en donde el punto más cercano al mar se supone más húmedo.

A través del uso de esta función de regresión, es posible efectuar estimaciones con un error de hasta 30% con respecto al promedio mensual, y se considera aceptable debido a la gran variabilidad local y estacional de la cantidad de precipitación en la zona.

Cuadro 5. Resumen del modelo de regresión lineal múltiple siendo la precipitación total promedio mensual la variable dependiente y la altitud, longitud y latitud las variables independientes

Mes	r	r <sup>2</sup>	Error estándar de la estimación	$\beta_0$	$\beta_1$ (z)	$\beta_2$ (x)	$\beta_3$ (y)
ENERO	.78	.60	6.82	-557.924161	0.01401229	0.00018163	0.00017899
					..	.	..
FEBRERO	.83	.68	2.57	-295.324397	0.00572653	0.00014436	0.00008871
					..	..	..
MARZO	.85	.72	2.53	-238.904628	0.00564483	0.00020524	0.000059845
					..	..	..
ABRIL	.75	.57	6.12	-651.459969	0.00454139	0.00030582	0.00020555
						..	..
MAYO	.79	.62	9.56	-977.468736	0.01654297	0.00041842	0.00030951
					.	..	..
JUNIO	.83	.68	12.18	-1389.91131	0.02498031	0.00078981	0.0004019
					..	..	..
JULIO	.74	.54	12.18	-902.291243	0.02221484	0.00060444	0.00024953
					.	..	.
AGOSTO	.78	.61	21.19	-2462.65744	0.00439918	0.00135065	0.00073507
						..	..
SEPTIEMBRE	.86	.74	21.13	-2780.65057	-0.00373895	0.00189007	0.0007842
						..	..
OCTUBRE	.84	.70	11.12	-1740.06282	-0.00775499	0.00078857	0.00054853
						..	..
NOVIEMBRE	.70	.49	4.07	-274.543305	0.00595826	0.00008090	0.000090622
							..
DICIEMBRE	.86	.74	4.04	-314.347037	0.01671787	0.00023748	0.00007945
					..	..	.

.. Nivel de significación = 95%

▪ Nivel de significación = 90%

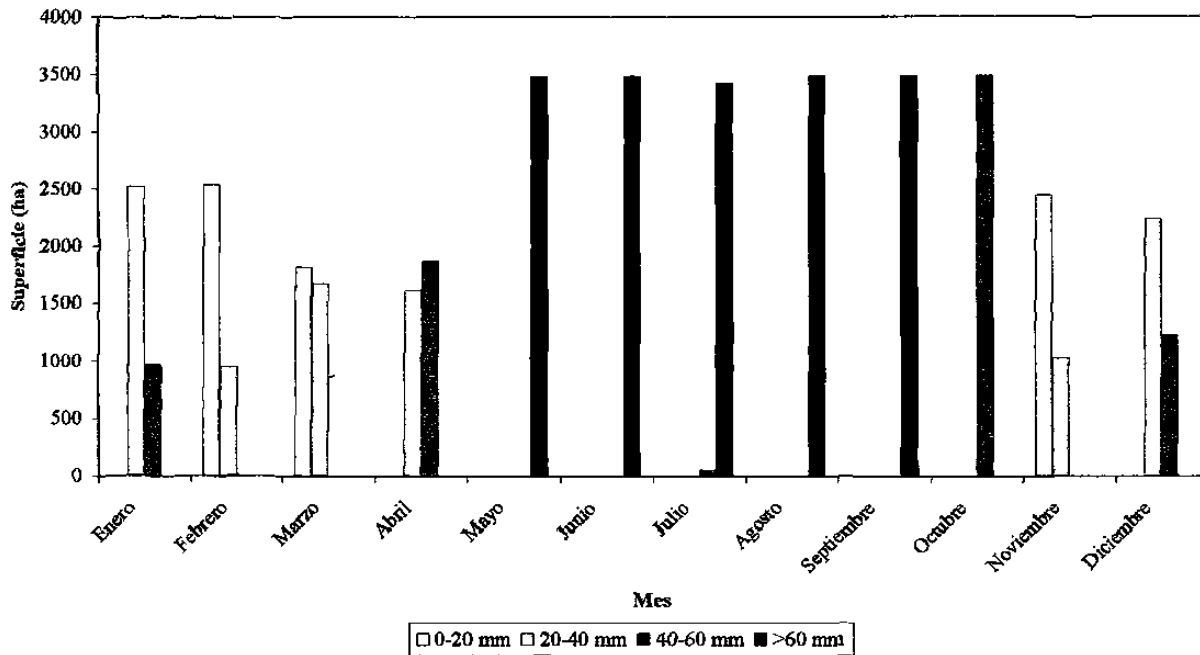


Figura 9. Superficies obtenidas a partir del mapa de precipitación total media mensual

La figura 9 representa la cantidad de precipitación y la superficie de incidencia mensual de la lluvia, en donde destaca el periodo de enero a abril, donde en la mayor superficie se presentan precipitaciones entre 0 y 40 mm, siendo éste el periodo con mayor ocurrencia de incendios forestales. Para los meses lluviosos, la totalidad de la superficie tiene incidencia de lluvia mayor a los 60 mm.

El análisis aislado de las variables temperatura máxima y precipitación no contribuye a la explicación de la ocurrencia de incendios, de tal forma que es necesario llevar a cabo un análisis integral de ambas variables. En la figura 10 se describe, primero, la distribución temporal de la temperatura media mensual y la precipitación total media mensual. A partir de esta gráfica, se hace posible la definición de un periodo seco, marcado en el momento en que los valores de temperatura son superiores a los de la precipitación, y que para los fines del presente estudio sirvieron como límites para definir la temporada de incendios desde el punto de vista meteorológico. De tal forma que, los meses más calurosos no necesariamente

representan un peligro mayor de incendios que los meses menos cálidos, ya que en éstos últimos es donde se presentan las menores cantidades de precipitación.

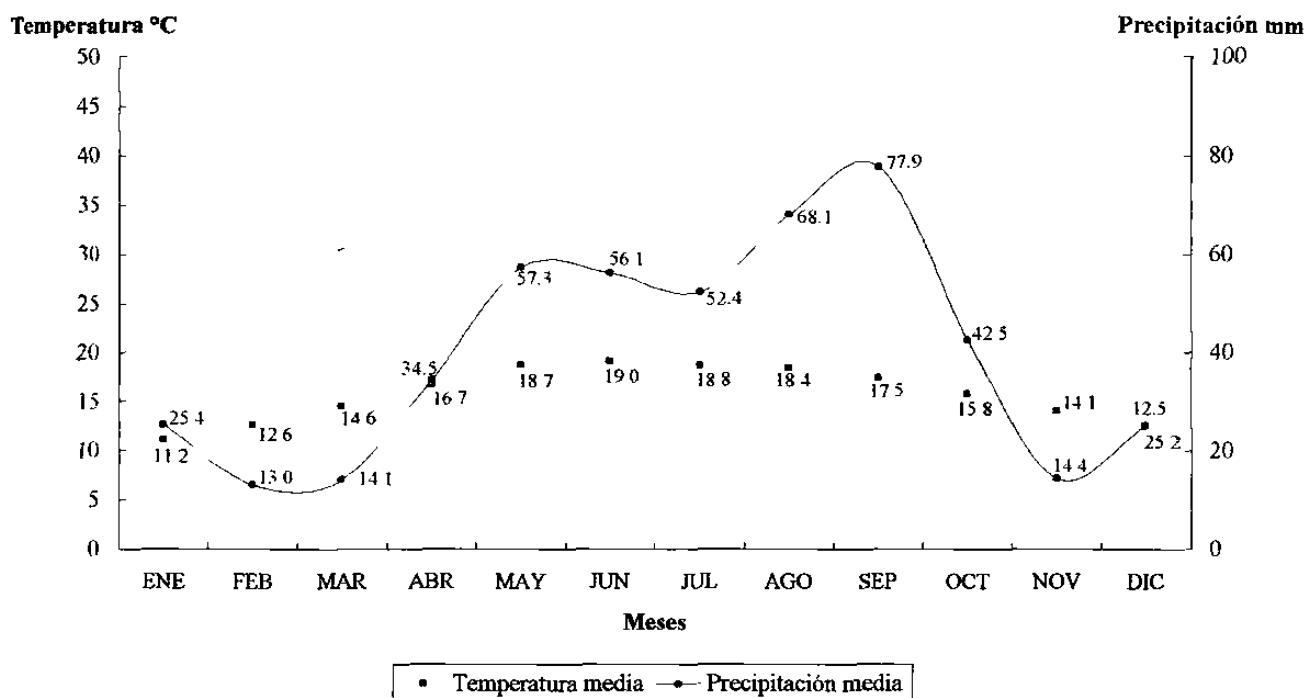


Figura 10. Distribución temporal de la temperatura media y la precipitación total media mensual

## 6.4. VARIABLES TOPOGRÁFICAS

### 6.4.1. Orientación de pendientes

La distribución de la orientación de las pendientes en el área arbolada del Ejido Corona del Rosal es similar para cada clase (cuadro 6), siendo la mayor superficie ocupada por laderas orientadas hacia el noreste y la menor superficie se encuentra en sitios sin pendiente, y por lo tanto carentes de una orientación.

Las laderas que ocupan las exposiciones sur, suroeste y sureste, ocupan un 33.58 % de la superficie, siendo las zonas con mayor Peligro de Incendios, debido a las condiciones bajas de humedad y temperatura que presentan en comparación con el resto de las orientaciones.

Cuadro 6. Superficies por clase de orientación de pendientes

Orientación de pendientes	Superficie (ha)	Superficie (%)
Norte	386.28	11.08
Noreste	635.94	18.24
Este	402.93	11.56
Sureste	301.14	8.64
Sur	384.84	11.04
Suroeste	484.56	13.90
Oeste	453.33	13.00
Noroeste	356.31	10.22
Planas	080.64	02.31

En el mapa 3 del anexo cartográfico se muestra la distribución espacial de la orientación de la pendiente en el área.

## 6.5. VARIABLES SOCIOECONÓMICAS

### 6.5.2.1. Áreas de aprovechamiento forestal

Debido a importancia de conocer la distribución de las áreas de aprovechamiento forestal por el riesgo que implica la presencia de operadores en las actividades de corta y extracción, se cuantificó la superficie bajo manejo forestal por cada uno de los tipos de vegetación estudiados, resultados que se muestran en el cuadro 7. La superficie total intervenida en las áreas arboladas estudiadas es de 1501.11 ha, representando el 43.05 % de las mismas.

Cuadro 7. Superficies bajo aprovechamiento en áreas arboladas del Ejido Corona del Rosal

Tipo de vegetación	Superficie bajo aprovechamiento(ha)	% de la superficie arbolada
Bosque de <i>Pinus pseudostrabus</i>	196.02	5.62
Bosque de <i>Pinus pseudostrabus</i> asociado con chaparral	314.01	9.01
Chaparral asociado con Bosque de <i>Pinus pseudostrabus</i>	031.14	0.89
Bosque de <i>Pinus cembroides</i>	081.63	2.34
Bosque de <i>Pinus cembroides</i> asociado con chaparral	182.07	5.22
Chaparral asociado con Bosque de <i>Pinus cembroides</i>	055.35	1.59
Bosque de pino-encino	271.71	7.79
Bosque de encino-pino	369.18	10.59

Puede observarse que el porcentaje los porcentajes de superficie de aprovechamiento con respecto a la superficie arbolada corresponde, primero, a que los tipos de vegetación bajo aprovechamiento ocupan grandes superficies, y segundo, las áreas destinadas al aprovechamiento forestal con mayor superficie corresponden a los tipos de vegetación en donde domina la vegetación arbórea y la especie *Pinus pseudostrabus*.

### 6.5.2.2. Vías de acceso

La densidad de caminos forestales dentro del área de estudio es muy baja, encontrándose los caminos con mejores condiciones dentro de las áreas de aprovechamiento. En el cuadro 8 se muestran las longitudes de las vías de acceso a las áreas arboladas del Ejido. Solo una pequeña parte de la carretera Galeana-La Ascención entra al Ejido, por la parte suroeste del mismo. Lo anterior implica una baja influencia humana al menos por parte de visitantes ajenos a las actividades de extracción.

Cuadro 8. Longitud de vías de acceso en el Ejido Corona del Rosal

Tipo de vía de acceso	Longitud (km)
Brechas	22.93
Carreteras	5.98
Veredas	17.30

### 6.5.2.3. Poblaciones

Las localidades poblacionales en el Ejido Corona del Rosal son pocas, siendo las más importantes Corona del Rosal, San Felipe, El Alamar de Solís y Cieneguillas. El mayor número de habitantes radica en Corona del Rosal, con 61 habitantes, seguido de San Felipe, que posee 17 habitantes. Existen, además, nueve rancherías aisladas cuyo número de habitantes es entre 1 y 5. Para los fines de este estudio, se consideró únicamente la distancia a los poblados, dada la baja aportación por parte de la densidad de población en cuanto a importancia dentro del Índice de Causa.



## 6.6 EVALUACIÓN DEL PELIGRO DE INCENDIOS FORESTALES

Como se comentó con anterioridad, el método empleado para integrar las variables que influyen en el Peligro de Incendios fue la Evaluación Multicriterio.

Los valores de importancia asignados a los atributos que dieron origen al Índice de Combustibles Forestales (ICF), se muestran en el cuadro 9, en donde destacan los mayores valores de importancia a los atributos más relacionados con la facilidad de que un incendio pueda ocurrir, es decir, la cama de combustibles, la profundidad del mantillo y los combustibles ligeros. La consistencia de los valores de importancia para este caso fue aceptable, presentándose un valor de 0.02.

Cuadro 9. Valores de importancia para los atributos del Índice de Combustibles Forestales

Atributo	Valor de importancia
Cama de combustibles	0.3067
Combustibles ligeros	0.2610
Combustibles pesados	0.0613
Profundidad del mantillo	0.3710
<i>Índice de consistencia</i> 0.02	

Para la generación del ICF se ordenaron jerárquicamente estos valores de importancia, quedando de la siguiente forma:

<i>Primer orden</i>	<i>Segundo Orden</i>	<i>Tercer Orden</i>	<i>Cuarto Orden</i>
0.3067	0.3710	0.2610	0.0613

En este sentido, el Peligro de Incendios fue dirigido hacia aquellas áreas con mayor carga en la cama de combustibles, mayor profundidad y mayor carga de combustibles ligeros (ver mapa 4).

Los valores del ICF oscilaron entre 118 y 212, en el cuadro 10 se presentan los valores del Índice de Combustibles por tipo de vegetación, en donde puede apreciarse que las áreas con mayor peligro dado por este Índice, son los bosques de *P. pseudostrobus*, bosques de encino-pino, bosques de pino-encino, que son las áreas que presentaron mayor carga de combustibles ligeros, de cama de combustibles y profundidad como resultado del inventario llevado a cabo.

Cuadro 10. Valores del Índice de Combustibles por tipo de vegetación

Tipo de vegetación	ICF
Bosque de <i>Pinus pseudostrobus</i>	212
Bosque de <i>Pinus pseudostrobus</i> asociado con chaparral	179
Chaparral asociado con Bosque de <i>Pinus pseudostrobus</i>	181
Bosque de <i>Pinus cembroides</i>	118
Bosque de <i>Pinus cembroides</i> asociado con chaparral	160
Chaparral asociado con Bosque de <i>Pinus cembroides</i>	141
Bosque de pino-encino	181
Bosque de encino-pino	191

Por su parte, los valores de importancia para los componentes del Índice Meteorológico (IM), se presentan en el cuadro 11. El mayor valor de importancia fue asignado a la precipitación total media mensual, ya que esta actúa de una forma semejante a una restricción, en donde, a partir de una cantidad elevada de lluvia se tiende a nulificar la presencia de incendios forestales. Sin embargo, la temperatura media máxima adquirió mayor importancia que la orientación de la pendiente. El nivel de peligro dado por este Índice, puede ser interpretado de tal forma que conforme la cantidad de precipitación aumenta, el valor del Índice descende a pesar de que la temperatura máxima se incrementa, ya que sólo la

temperatura máxima aporta 25 % de la importancia. El índice de consistencia obtenido estuvo dentro del rango de aceptación, alcanzando un valor de 0.05.

Cuadro 11. Valores de importancia para los atributos del Índice Meteorológico

Atributo	Valor de importancia
Temperatura máxima	0.2493
Precipitación total	0.5936
Orientación de la pendiente	0.1571
<i>Índice de consistencia 0.05</i>	

En cuanto a la jerarquización de estos valores de importancia, el orden de los valores se asignó como sigue, orientándose el grado de peligro hacia las zonas más secas:

<i>Primer orden</i>	<i>Segundo Orden</i>	<i>Tercer Orden</i>
0.5936	0.2493	0.1571

Los valores máximos alcanzados para este Índice se muestran en el cuadro 12. Durante los meses de febrero, marzo, abril y noviembre el IM alcanzó los valores máximos, que coinciden con las dos estaciones secas que se presentan anualmente en el área de estudio.

Se observa un valor constante para los meses lluviosos, explicado, en gran parte por la similitud en la cantidad de precipitación total media para cada uno de estos meses, y, que, la cantidad de lluvia precipitada en este periodo sobrepasa ampliamente la cantidad de precipitación esperada mensualmente.

Cuadro 12. Valores máximos del Índice Meteorológico a nivel mensual

Mes	Valor máximo del IM
ENERO	135
FEBRERO	224
MARZO	210
ABRIL	252
MAYO	65
JUNIO	65
JULIO	65
AGOSTO	65
SEPTIEMBRE	65
OCTUBRE	65
NOVIEMBRE	224
DICIEMBRE	134

Para el caso del Índice de causa, el cuadro 13 muestra la asignación de los valores de importancia para los atributos involucrados en la creación de este Índice. Las áreas de aprovechamiento recibieron el mayor valor de importancia, ya que representan zonas de intensa influencia humana. De forma similar, a la distancia a brechas se le asignó un valor alto, ya que se encuentran situadas dentro de las áreas de corta y representan las vías de transporte de vehículos con carga de madera y además, a los lados de estas brechas suelen establecerse los campamentos de los operadores de actividades de corta. La distancia a poblados recibió un menor valor de importancia debido, como ya se mencionó, a la baja densidad de población en el área.

Por su parte, el valor del índice de consistencia fue aceptable, en función de su valor de 0.08.

Cuadro 13. Valores de importancia para los atributos del Índice de Causa

Atributo	Valor de importancia
Áreas de aprovechamiento	0.4211
Distancia a brechas	0.3431
Distancia a carreteras	0.0500
Distancia a veredas	0.0687
Distancia a poblados	0.1172
<i>Índice de consistencia</i> 0.08	

Con respecto a la jerarquización de los valores de importancia, el orden quedó de la siguiente manera, dirigiéndose el grado de peligro hacia los factores determinados por actividades de aprovechamiento:

<i>Primer orden</i>	<i>Segundo Orden</i>	<i>Tercer Orden</i>	<i>Cuarto Orden</i>	<i>Quinto Orden</i>
0.4211	0.3431	0.1172	0.0687	0.0500

El Índice de Causa obtuvo valores de 12 a 67, alcanzando su valor máximo para las zonas circundantes a las brechas de extracción dentro de las áreas de corta. La distribución espacial de este índice se muestra en el mapa 5.

La etapa final en la Evaluación del Peligro de Incendios, consistió en la integración de los tres Índices descritos anteriormente, para lo cual se repitió el proceso meteorológico y dar lugar al Índice de Peligro de Incendios Forestales (IPIF).

Los valores de importancia asignados a cada subíndice se muestran en el cuadro 14. Puede observarse, nuevamente, que la mayor importancia fue designada a las condiciones meteorológicas, seguida por la cantidad y tipo de combustibles forestales, y, por último, los factores socioeconómicos recibieron el menor valor de importancia por todas las razones que ya han sido discutidas previamente. La consistencia de la evaluación de los criterios presentó un nivel alto, alcanzando un valor de 0.06.

Cuadro 14. Valores de importancia para los atributos del Índice de Peligro de Incendios Forestales

Atributo	Valor de importancia
Índice de Combustibles	0.2684
Índice Meteorológico	0.6144
Índice de Causa	0.1172
<i>Índice de consistencia</i> 0.06	

El grado de Peligro de Incendios fue dirigido hacia el Índice Meteorológico, de tal forma que los valores de importancia ordenados fueron los siguientes:

<i>Primer orden</i>	<i>Segundo Orden</i>	<i>Tercer Orden</i>
0.6144	0.6144	0.1172

Los Índices de Peligro de Incendios tienen una variación espacial y temporal. La variación espacial está dada por la distribución del peligro a través del territorio y en distinto grado en función de los factores evaluados con anterioridad. El cuadro 15 muestra la superficie arbolada con mayor Peligro de Incendios a nivel mensual.

La mayor superficie de las áreas arboladas posee grados de Peligro bajos y medios. En general, para los meses lluviosos y, para la mayor parte de la superficie arbolada, el grado de Peligro es muy bajo o bajo.

Sin embargo, para los meses secos, del 50 al 60 % de la superficie tiene un grado de peligro medio, llegándose a encontrar zonas de hasta el 40 % de la superficie con un grado alto de Peligro. Existen, además, áreas cuyas condiciones meteorológicas extremas, de gran cantidad de combustibles y alta influencia socioeconómicas se unen dando lugar a un grado extremo de Peligro de Incendios, sin embargo, estas zonas son las menos representativas de la superficie total, no rebasando del 4 % de la superficie total arbolada y únicamente para los meses secos.

Cuadro 15. Superficies por grado de Peligro de Incendios a nivel mensual

Mes	Grado de Peligro de Incendios Forestales									
	<i>Muy Bajo</i>		<i>Bajo</i>		<i>Medio</i>		<i>Alto</i>		<i>Muy alto</i>	
	Superficie (ha)	%	Superficie (ha)	%	Superficie (ha)	%	Superficie (ha)	%	Superficie (ha)	%
<b>ENERO</b>	130.14	3.73	2566.71	73.50	762.39	21.83	32.67	0.94	0	0.00
<b>FEBRERO</b>	0	0.00	110.79	3.17	2052.36	58.77	1278.18	36.60	50.58	1.45
<b>MARZO</b>	0	0.00	226.35	6.48	2157.03	61.77	1080.54	30.94	27.99	0.80
<b>ABRIL</b>	0.18	0.01	764.28	21.89	1472.58	42.17	1134	32.48	120.87	3.46
<b>MAYO</b>	157.23	4.50	3229.29	92.48	105.39	3.02	0	0.00	0	0.00
<b>JUNIO</b>	206.37	5.91	3189.06	91.33	96.48	2.76	0	0.00	0	0.00
<b>JULIO</b>	292.86	8.39	3112.02	89.12	87.03	2.49	0	0.00	0	0.00
<b>AGOSTO</b>	215.01	6.16	3182.31	91.13	94.59	2.71	0	0.00	0	0.00
<b>SEPTIEMBRE</b>	142.47	4.08	3240.72	92.81	108.72	3.11	0	0.00	0	0.00
<b>OCTUBRE</b>	155.61	4.46	3230.37	92.51	105.93	3.03	0	0.00	0	0.00
<b>NOVIEMBRE</b>	0	0.00	55.53	1.59	1884.69	53.97	1483.65	42.49	68.04	1.95
<b>DICIEMBRE</b>	199.89	5.72	2718.27	77.84	558.99	16.01	14.76	0.42	0	0.00

El IPIF alcanzó los valores máximos para los meses de febrero, marzo, abril y noviembre, llegando hasta un valor de 121. La figura 11 muestra los valores promedio mensuales del IPIF distribuidos temporalmente.

Para los meses lluviosos, el IPIF disminuye considerablemente, aún así, existen áreas con un grado de Peligro medio, dado, no por factores meteorológicos, sí por combustibles forestales e incidencia humana en las áreas de aprovechamiento.

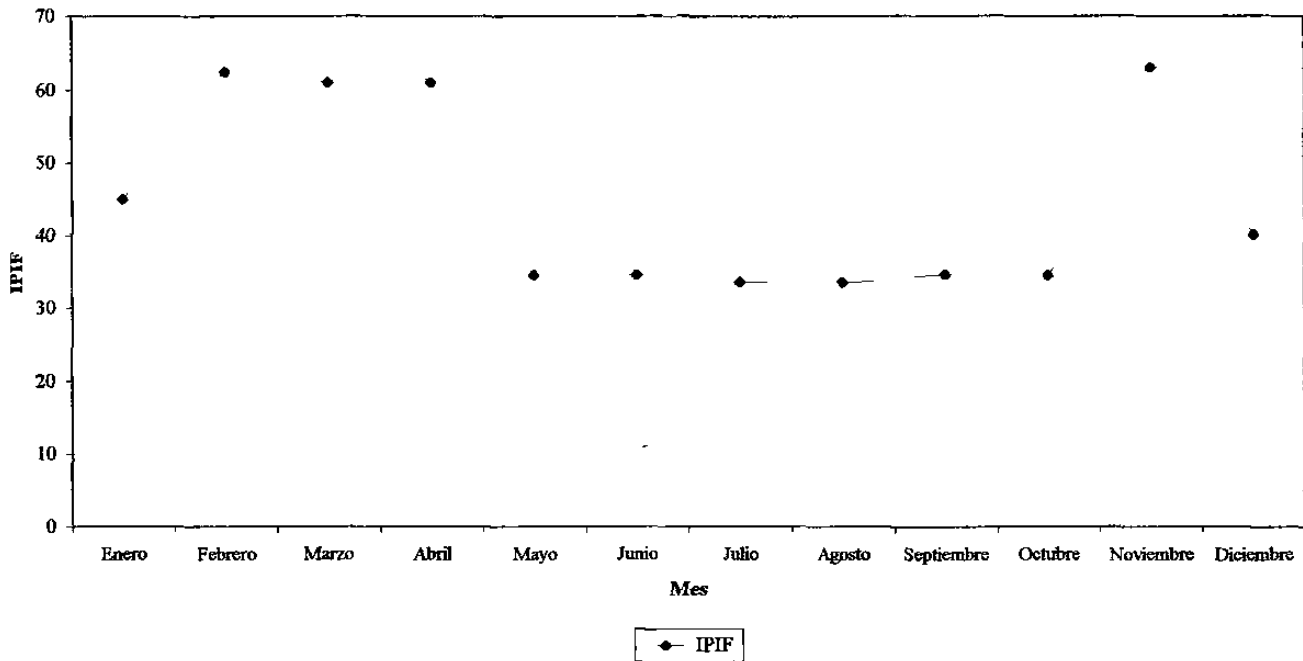


Figura 11. Distribución temporal de los valores promedio mensuales del IPIF

Los valores más elevados representan las dos estaciones secas, combinándose las altas temperaturas con los niveles bajos en la cantidad de lluvia precipitada, contribuyendo esto, además a una pérdida de humedad en los combustibles forestales que aumentan la probabilidad de que un incendio ocurra.

La influencia humana, vista como agente causal y aunada a las condiciones meteorológicas y de combustibles mencionadas, resultan en el aumento de los valores del Índice de Peligro de Incendios Forestales.



## 7. CONCLUSIONES

El conocimiento de la distribución del Peligro de Incendios dentro del Ejido Corona del Rosal permite planear estrategias de control y combate de incendios forestales en las áreas arboladas, de tal manera que los recursos humanos destinados para las labores de control y combate pueden ser dirigidos a las áreas donde se espera un mayor grado de Peligro.

La actualización de la ocupación del suelo fue elaborada de una forma rápida a través del programa ILWIS<sup>®</sup>2.1 for Windows<sup>®</sup>,, permitiendo niveles de error aceptables y proveyendo de la digitalización en pantalla de los contactos de cada uno de los polígonos actualizados.

La técnica de intersecciones planares para la evaluación de combustibles forestales es de rápida aplicación y es recomendable que el personal técnico de la Unidad de Conservación y Desarrollo Forestal No. 1 Galeana, obtenga datos referentes a combustibles forestales durante los periodos del inventario para manejo forestal.

En las áreas en donde la cantidad de combustibles forestales es alta, se recomienda llevar a cabo quemas prescritas con la finalidad de reducir la cantidad de combustibles ligeros y de esta forma contribuir a la disminución del Peligro de Incendios. En este sentido, es igualmente recomendable controlar la cantidad de residuos de corta producto del aprovechamiento, para evitar una acumulación excesiva de material combustible, principalmente ramas de árboles troceados.

Es factible llevar a cabo estimaciones termopluviométricas a través de funciones de regresión lineal en la porción estudiada de la Sierra Madre Oriental. Sin embargo, se debe trabajar en el desarrollo de modelos que contemplen una resolución temporal mayor y dar lugar a estimaciones que permitan detectar cambios más puntuales en las variables meteorológicas.

La metodología de Evaluación Multicriterio demostró requerir de una operación relativamente sencilla y con resultados suficientemente robustos para la estimación de los Índices de Peligro de Incendios Forestales.

Aunque en el presente estudio el factor socioeconómico no resultó ser más importante que los criterios referentes a combustibles forestales y a variables meteorológicas, no debe dejar de considerarse en futuras evaluaciones del Peligro, ya que representan las causas de incendios más importantes en regiones con mayor presión hacia los recursos forestales.

Finalmente, cabe señalar que para el desarrollo de la presente investigación se utilizaron datos accesibles para cualquier manejador de recursos forestales, como el empleo de programas de cómputo económicos, fotografías aéreas, cartografía y bases de datos en formato digital, así como de técnicas para el análisis de cada uno de los criterios que determinan el Peligro de Incendios, por lo que se debe tomar en cuenta la incorporación de este tipo de evaluaciones dentro de un esquema integrado de Manejo Forestal.

---

## 8. LITERATURA CITADA

- Alanís, H.; Orozco, F. 2000. Índice de riesgo de incendios forestales en la región central del macizo boscoso de Chihuahua. Centro de Investigación Regional del Norte-Centro, Campo Experimental Madera. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Folleto técnico No. 11. Febrero de 2000.
- Alcalá, G. J. y Ruiz, C. J. 1995. Desarrollo de un modelo para la estimación de la humedad relativa. Instituto de Astronomía y Meteorología. Universidad de Guadalajara. Boletín informativo mensual. Año XXXI, Número 364. Diciembre de 1995. Guadalajara, México.
- Almeida, R. 1994. Forest fire risk areas and definition of the prevention priority planning actions using GIS. EGIS Foundation.  
<http://www.sgi.ursus.maine.edu/gisweb/spatdb/egis/eg94193.html>
- Alvarado, E. 1986. Comportamiento del fuego en rodales poco perturbados de *Pinus montezumae* Lamb. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. Montecillos, México.
- Aparicio, M. F. 1999. Fundamentos de hidrología de superficie. Limusa, Noriega Editores. México, D.F.
- Anónimo. 2000. Geography 475, Lecture 5. University of Idaho.  
<http://geolibrary.mines.uidaho.edu/courses/Geog475/Lectures/5/>

- Brenner, J; Arvanitis, L.; Brackett, D; Lee, B.; Carr, R.; Suddaby, R. 1998. Integrating GIS, mesoscale fire weather prediction, smoke plume dispersion modelling for the enhanced open burning authorizations and wildfire response in Florida. *Universidad de Florida. Estados Unidos de América.*  
<http://www.aris.sfrc.ufl.edu/Laboratories/GIS/presentations/p612.htm>
- Brown, J.K. 1974. *Handbook for inventorying downed woody material.* USDA Forest Service. General Technical Report INT-16. Utah, Estados Unidos de América.
- Brown, J.K.; Oberheu, R. D.; Johnston, C. M. 1982. *Handbook for inventorying surface fuels and biomass in the interior west.* USDA Forest Service. General Technical Report INT-129. Estados Unidos de América.
- Capó, A. M. 1999. *La estimación de riesgo, como ayuda a la prevención de incendios. Incendios forestales y agropecuarios: prevención e impacto y restauración de los ecosistemas.* UNAM, Dirección General de Publicaciones y Fomento Editorial. México.
- Cedeño, S. O. 1999. *Incendios forestales en México en 1998: magnitud, extensión, combate y control. Incendios forestales y agropecuarios: prevención e impacto y restauración de los ecosistemas.* UNAM, Dirección General de Publicaciones y Fomento Editorial. México.
- Collins, F.; Bolstad, P. 1996. A comparison of spatial interpolation techniques in temperature estimation. *Proceedings of the Third International Conference/Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling.* January 21-26, Santa Bárbara, California, Estados Unidos de América.  
[http://www.ncgia.ucsb.edu/conf/SANTA\\_FE\\_CD-ROM/sf\\_papers/collins\\_fred/collins.html](http://www.ncgia.ucsb.edu/conf/SANTA_FE_CD-ROM/sf_papers/collins_fred/collins.html)

- Chuvienco, E.; Salas, F.; Vega, C. 2000. Remote sensing and GIS for long-term fire risk mapping. Megafires Project.  
<http://www.infocarto.es/id/eur/position-papers.html>
- Chuvienco, E. 1990. Fundamentos de teledetección espacial. Ediciones RIALP, S.A. Madrid, España.
- Cruz de León, J. G. 1991. Untersuchung des technologischen Gebrauchswertes der mexikanischen Kiefernart *Pinus pseudostrobus* Lindley. Göttinger Beiträge zur land-und Forstwirtschaft in den tropen und subtropen. Heft 66. Göttingen, Alemania.
- Eastman, R. 1999. Idrisi32, Guide to GIS and Image Processing, Volume 2. Clark Labs, Clark University. Worcester, MA, Estados Unidos de América.
- Environmental Systems Research Institute. 1998. The GIS Glossary.  
[http://www.esri.com/library/glossary/t\\_z.html](http://www.esri.com/library/glossary/t_z.html)
- Felicísimo, A. 1994. *Modelos Digitales del Terreno. Libro en formato digital.* España.  
<http://www.etsimo.uniovi.es/~feli/TextosP.html>
- Flores, J.; Benavides, J. 1994. Influencias de dos tipos de quemas controladas en bosques de pino en Jalisco. Centro de Investigaciones del Pacífico Centro, Campo Experimental Colomos. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Folleto técnico No. 5. Noviembre de 1994.
- Fuentes, T. F.; Silva, G. J.; Montes, R. E. 1996. Manual del secado técnico convencional de la madera. Departamento de Madera, Celulosa y Papel "Ing. Karl Augustin Grellman". Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingeniería. Universidad de Guadalajara. Guadalajara, México.

- García, E. 1986. Apuntes de climatología. 5ª edición. UNAM. México, D.F.
- García, E. 1973. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. UNAM.
- García, E.; CONABIO. 1998. "Climas (Clasificación de Köppen, modificado por García)". Escala 1:1 000 000. México. Mapa en formato digital.
- García, V.; Woodard, P.; Titus, S.; Adamowicz, P.; Lee, B. 1999. Dos modelos para la predicción de incendios forestales en Whitecourt Forest, Canada. Investigación Agraria, Sistemas y Recursos Forestales. Vol. 8. Núm. 1. Junio de 1999. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. España.
- Gutiérrez. M.; Monedero G.; Sandía, A. 1997. Diseño de un mapa de incendios de vegetación en el Parque Nacional El Avila apoyado en Modelos Digitales del Terreno. Memorias del VII Simposio Latinoamericano de Percepción Remota. 2-7 de noviembre de 1997. Mérida, Venezuela
- Hägemark, L. 1999. Mesan – an Operational Mesoscale Analysis System.  
<http://www.smhi.se/sgn0106/if/meteorologi/mesan.htm>
- Heywood, I.; Oliver, J.; Tomlinson, S. 1994. Building an exploratory multi criteria modelling environment for spatial decision support. EGIS Foundation.  
<http://www.sgi.ursus.maine.edu/gisweb/spatdb/egis/eg94072.html>
- International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences. 1997. ILWIS 2.1. User's Guide. ILWIS Department. Enschede, Países Bajos.
- Magaña, O. 1985. Índices de peligro de incendios forestales. Boletín divulgativo No. 70. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales. Subsecretaría Forestal. México, D.F.

- Malczewski, J. 1997. Spatial Decision Support Systems, NCGIA Core Curriculum in GIScience, posted October 6, 1998.  
<http://www.ncgia.ucsb.edu/giscc/units/u127/u127.html>
- Malczewski, J. 1999. GIS and Multicriteria decision analysis. John Wiley & Sons, Inc. Estados Unidos de América.
- Mandallaz, D.; Ye, R. 1997. Prediction of forest fires with Poisson models. Canadian Journal of Forest Research. 1997, 27: 10. Canadá.
- Marcozzi, M.; Bovio, G.; Mandallaz, D.; Bachmann, P. 1994. Influence of the weather on the forest fire danger index in Ticino Canton. Schweizerische Zeitschrift fur Forstwesen. 1994, 145: 3. Suiza.
- Mathur. R.S.; Gogate, M.G.; Mittal, R.C. 1984. Forest fire danger rating indices based on climate - a case study of West Dehra Dun Forest Division. Indian Forester. 1984, 110: 3. India.
- Medina, G.; Ruiz, C.; Martínez, P.; Ortiz, V. 1997. Metodología para la determinación del potencial productivo de especies vegetales. Agricultura Técnica en México. Vol. 23. Número 1. Enero-Junio 1997. México.
- Natural Resources Canada, Canadian Forest Service. 1999. Canadian Wildland Fire Information System. Canadá. [www.nofc.forestry.ca/fire/cwffis/fwi](http://www.nofc.forestry.ca/fire/cwffis/fwi)
- Ninyerola, M.; Pons, X.; Roure, J. 2000. Climatological modelling, A metodological approach of climatological modeling of temperature and precipitation through GIS techniques.  
<http://www.creaf.uab.es/MIRAMON/publicat/papers/lisboa98/climodel.htm>

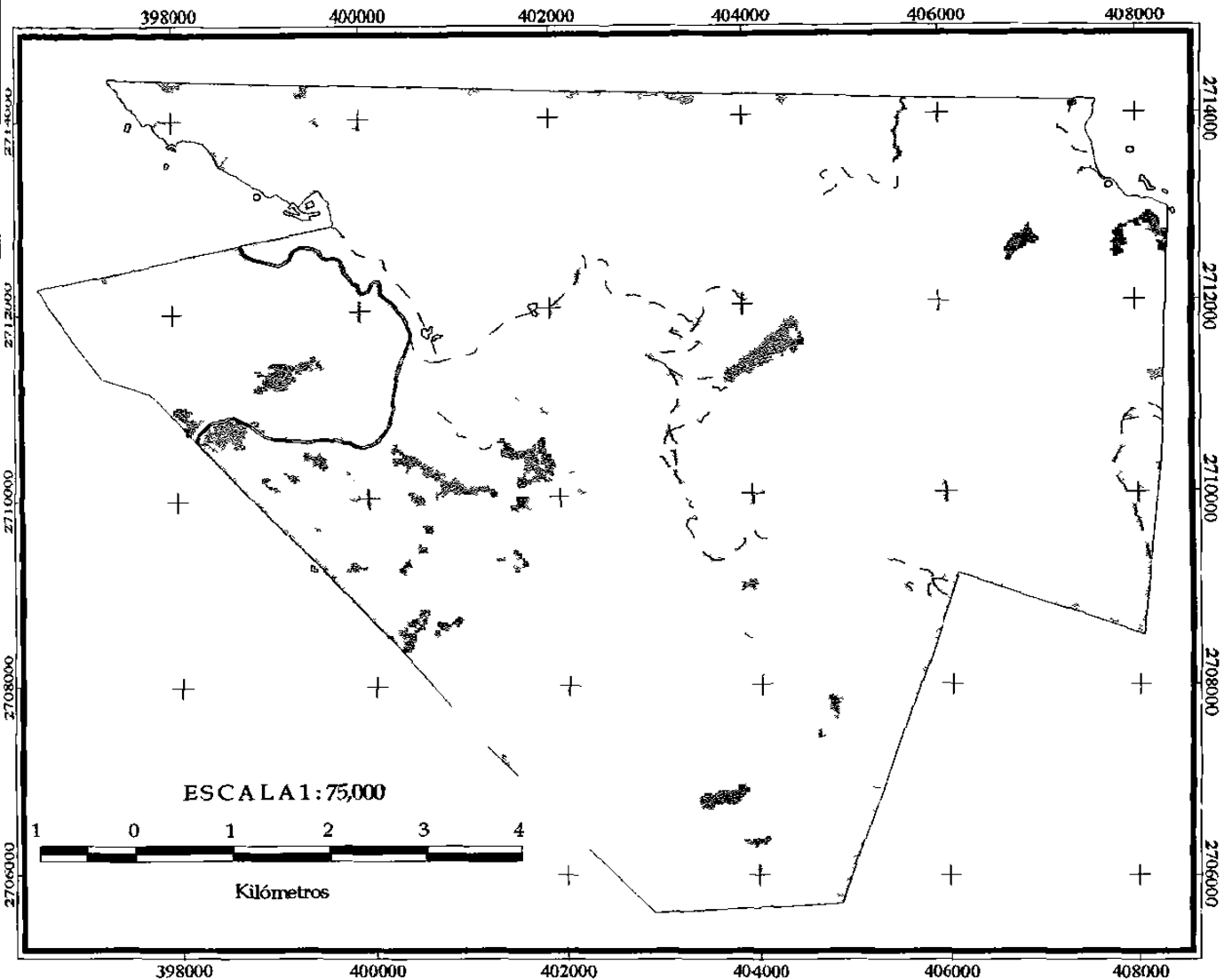
- Palacio, J. 1992. Introducción a los Sistemas de Información Geográfica. Consultora Geográfica y Asociados, S.C. Instituto de Geografía, UNAM. México, D.F.
- Paré, O. L. 1999. Causas estructurales de los incendios. Incendios forestales y agropecuarios: prevención e impacto y restauración de los ecosistemas. UNAM, Dirección General de Publicaciones y Fomento Editorial. México.
- Private Forest Management Team. 1999. Weather and fuel considerations. Auburn University, Alabama. <http://www.pfimt.org/standman/wxfuel.htm>
- Radke, J. 2000. A spatial decision support system for urban/wildland interface fire hazards. <http://www.esri.com/library/userconf/proc95/to200/p175.html>
- Rodríguez, D. 1996. Incendios Forestales. Mundi Prensa México, S.A. de C.V., Universidad Autónoma Chapingo. México, D.F.
- Salas, F. 1995. Detección de áreas de riesgo de incendio forestal a partir de los Sistemas de Información Geográfica y la Teledetección. Tesis Doctoral. Universidad de Alcalá de Henares. España.
- Salazar, L. y Nilsson, C. 1989. Integrating Geographic Information Systems into Fire Management. Proceedings of the 10<sup>th</sup> Conference on Fire & Forest Meteorology. Ottawa, Canadá.
- Sánchez C. y Zercero L. 1983. Método práctico para calcular la cantidad de combustibles leñosos y hojarasca. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, SARH. Nota divulgativa No. 9, PR-03. México.



- Sánchez, J. 1989. Los incendios forestales y las prioridades de investigación en México. Memoria del Congreso Forestal Mexicano. Tomo II. Toluca, México.
- Sánchez, P.; Sánchez S.; Carretero, C. 1999. Modelos y cartografía de estimaciones climáticas termoplumiométricas para la España peninsular. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid, España.
- Sárközy, F. 1998. GIS functions – interpolation. Technical University Budapest. Hungría.  
[http://www.agt.bme.hu/public\\_e/funcint/funcint.html](http://www.agt.bme.hu/public_e/funcint/funcint.html)
- Sarre, A. y Goldammer, J. 1996. Se quema la casa. Actualidad Forestal. Boletín de la Organización Internacional de las Maderas Tropicales. Vol. 4 No. 1. Japón.
- Schwarz, A. G. 1999. Fuels – General Aspects. Forest Fire Management FOR 340. University of Alberta. Canadá.
- SEMARNAP. 1999. Acciones contra incendios forestales de 1998. [www.semarnap.gob.mx](http://www.semarnap.gob.mx)
- SEMARNAP Delegación Federal en Nuevo León. 1999. Centro Estatal de Control de Incendios Forestales. <http://beta.semarnap.gob.mx/nl/indexIE.htm>
- SEMARNAT. 2001. [www.semarnap.gob.mx](http://www.semarnap.gob.mx)
- Star, J. y Estes, J. 1990. Geographic Information Systems. Prentice Hall. University of California, Santa Bárbara. Estados Unidos de América.
- Stolyarchuk, L. V. 1979. Structure of the forest fire seasons in the regions west and east of Lake Baikal. Lesnoe-Khozyaistvo, No. 7. Rusia.

- U.C.D.F. No. 1.1996. Programa de Manejo Forestal del Ejido Alfonso Corona del Rosal, municipio de Galeana, Nuevo León, México.
- U.S. Department of Agriculture, Forest Service. 1976. Intermediate fire behavior. Course reference. TT-80-(5100). Estados Unidos de América.
- U.S. Department of the Interior, Fish and Wildlife Service. 2000. Fire Effects Monitoring Reference Guide, Fuel Inventory. <http://fire.r9.fws.gov/ifcc/monitor/fuel.htm>
- U.S. Geological Survey. 1996. Digital Elevation Models. <http://grid2.cr.usgs.gov/dem/dem.html>
- Van Wagner, C.E. 1982. Practical aspects of the line intersect method. Petawawa National Forestry Institute. Canadian Forestry Service. Information Report PI-X-12 1982. Ontario, Canadá.
- Villalpando, F. y García E. 1993. Agroclimatología del estado de Jalisco. Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias. Universidad de Guadalajara. Guadalajara, México.
- Wanielista, M.; Kersten, R.; Eaglin, R. 1997. Hydrology. John Wiley & Sons, Inc. Segunda edición. Estados Unidos de América.
- Waters, N.M. 2000. Unit 40, Spatial interpolation. University of Calgary. <http://www.geog.ubc.ca/courses/klink/gis.notes/ncgia/u40.html#SEC40.2.1>
- Wolf, F. 1985. Algunas propiedades de la madera de *Pinus cembroides* Zucc. en Galeana, Nuevo León. Memorias del 1er Simposio Nacional sobre pinos piñoneros. Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Silvicultura y Recursos Renovables. 10, 11 y 12 de junio de 1985.

# **ANEXO CARTOGRÁFICO**



**S  
I  
M  
B  
O  
L  
O  
G  
I  
A**

	Población
	Ranchería
	Límite del Ejido
	Brecha
	Carretera
	Vereda

**L  
E  
Y  
E  
N  
D  
A**

Grado de Peligro de Incendios Forestales	
	Muy bajo
	Bajo
	Medio
	Alto
	Muy alto

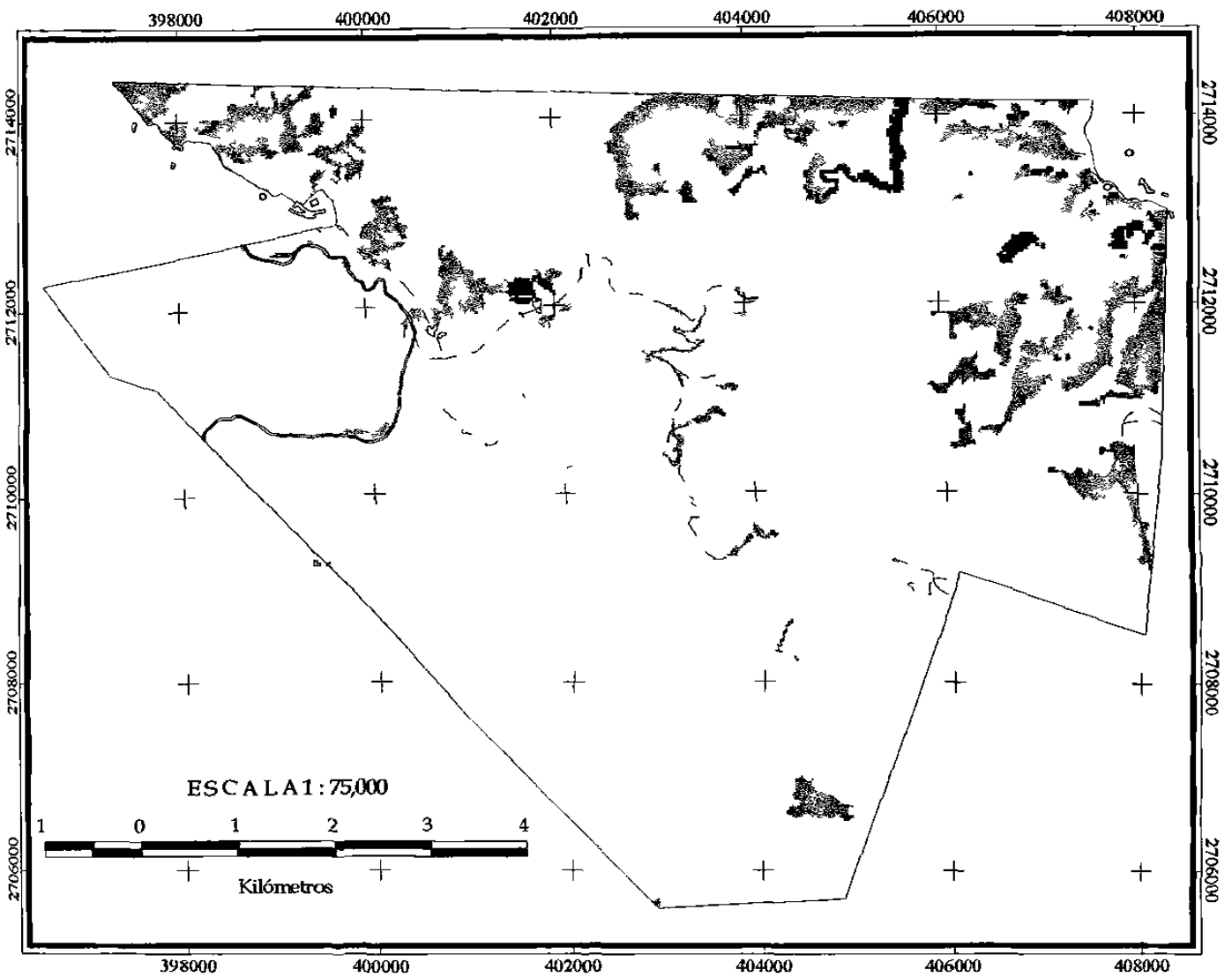
Áreas arboladas del Ejido Corona del Rosal

**Peligro de Incendios Forestales para el mes de Enero**

Fuente: *Elaboración propia a partir del análisis de variables topográficas, meteorológicas, combustibles forestales y rasgos socioeconómicos*

Proyección Transversal de Mercator  
Esferoide de Clarke de 1866  
Sistema de Coordenadas UTM

Mapa 6. Distribución del Peligro de Incendios Forestales para el mes de Enero



**S  
I  
M  
B  
O  
L  
O  
G  
I  
A**

	Población
	Ranchería
	Límite del Ejido
	Brecha
	Carretera
	Vereda

**L  
E  
Y  
E  
N  
D  
A**

	Muy bajo
	Bajo
	Medio
	Alto
	Muy alto

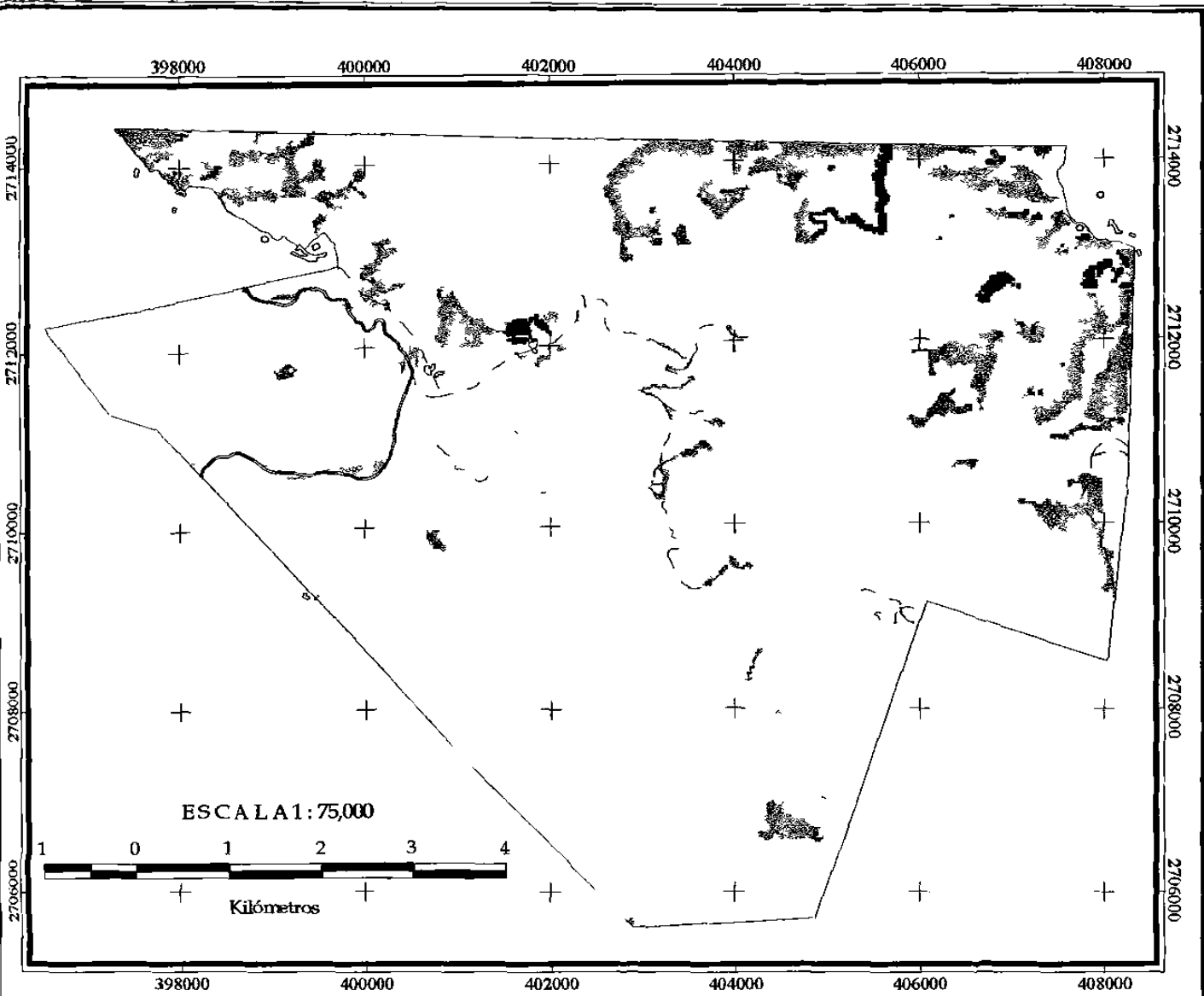
Áreas arboladas del Ejido Corona del Rosal

**Peligro de Incendios Forestales para el mes de Febrero**

Fuente: Elaboración propia a partir del análisis de variables topográficas, meteorológicas, combustibles forestales y rasgos socioeconómicos

Proyección Transversal de Mercator  
Esferoide de Clarke de 1866  
Sistema de Coordenadas UTM

Mapa 7. Distribución del Peligro de Incendios Forestales para el mes de Febrero

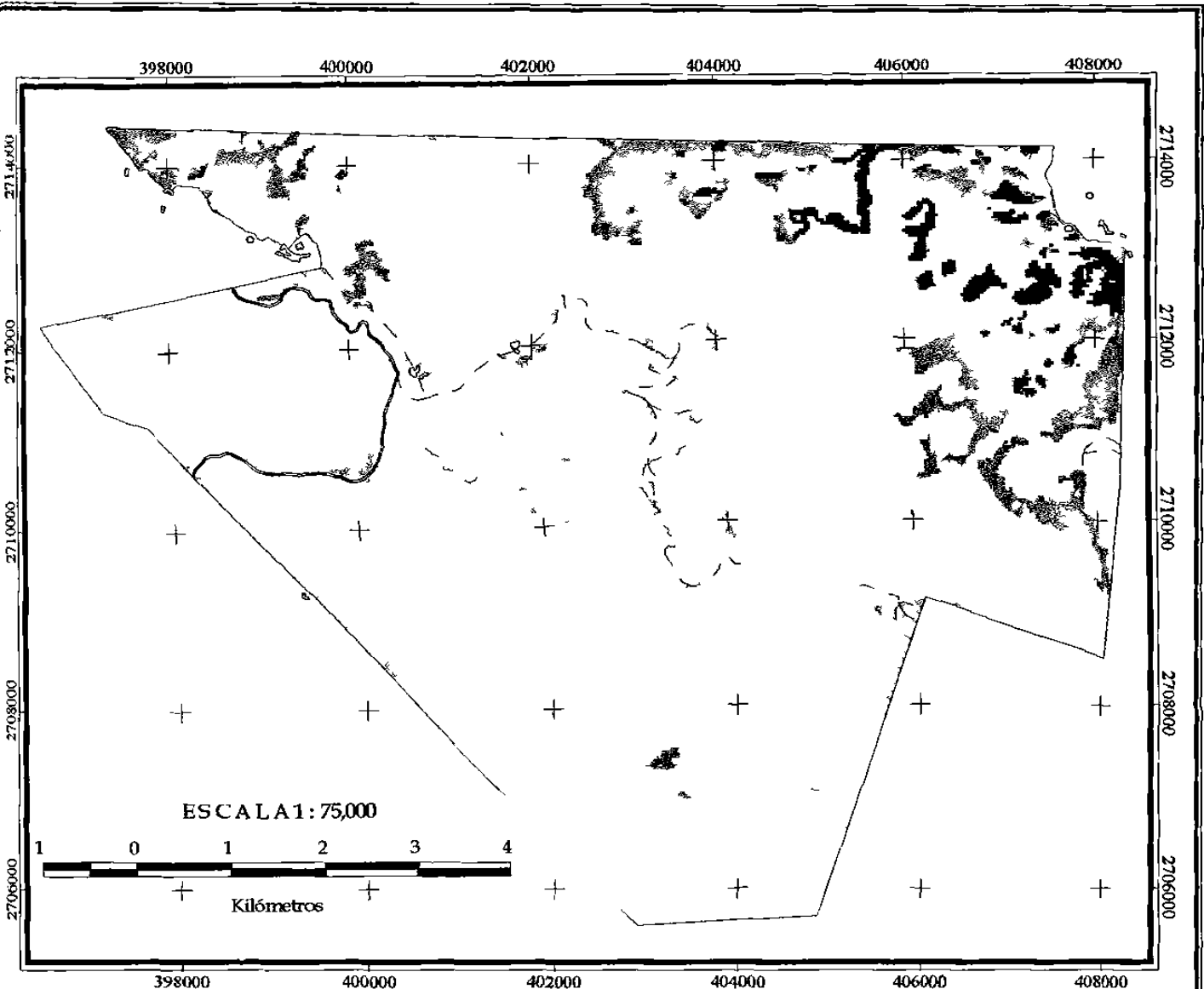


<b>S I M B O L O G I A</b>		Población	<b>L E Y E N D A</b>	Grado de Peligro de Incendios Forestales		Áreas arboladas del Ejido Corona del Rosal <b>Peligro de Incendios Forestales para el mes de Marzo</b>
		Ranchería			Muy bajo	
		Límite del Ejido			Bajo	
		Brecha			Medio	
		Carretera			Alto	
		Vereda			Muy alto	

Fuente: Elaboración propia a partir del análisis de variables topográficas, meteorológicas, combustibles forestales y rasgos socioeconómicos

Proyección Transversal de Mercator  
Esferoide de Clarke de 1866  
Sistema de Coordenadas UTM

Mapa 8. Distribución del Peligro de Incendios Forestales para el mes de Marzo

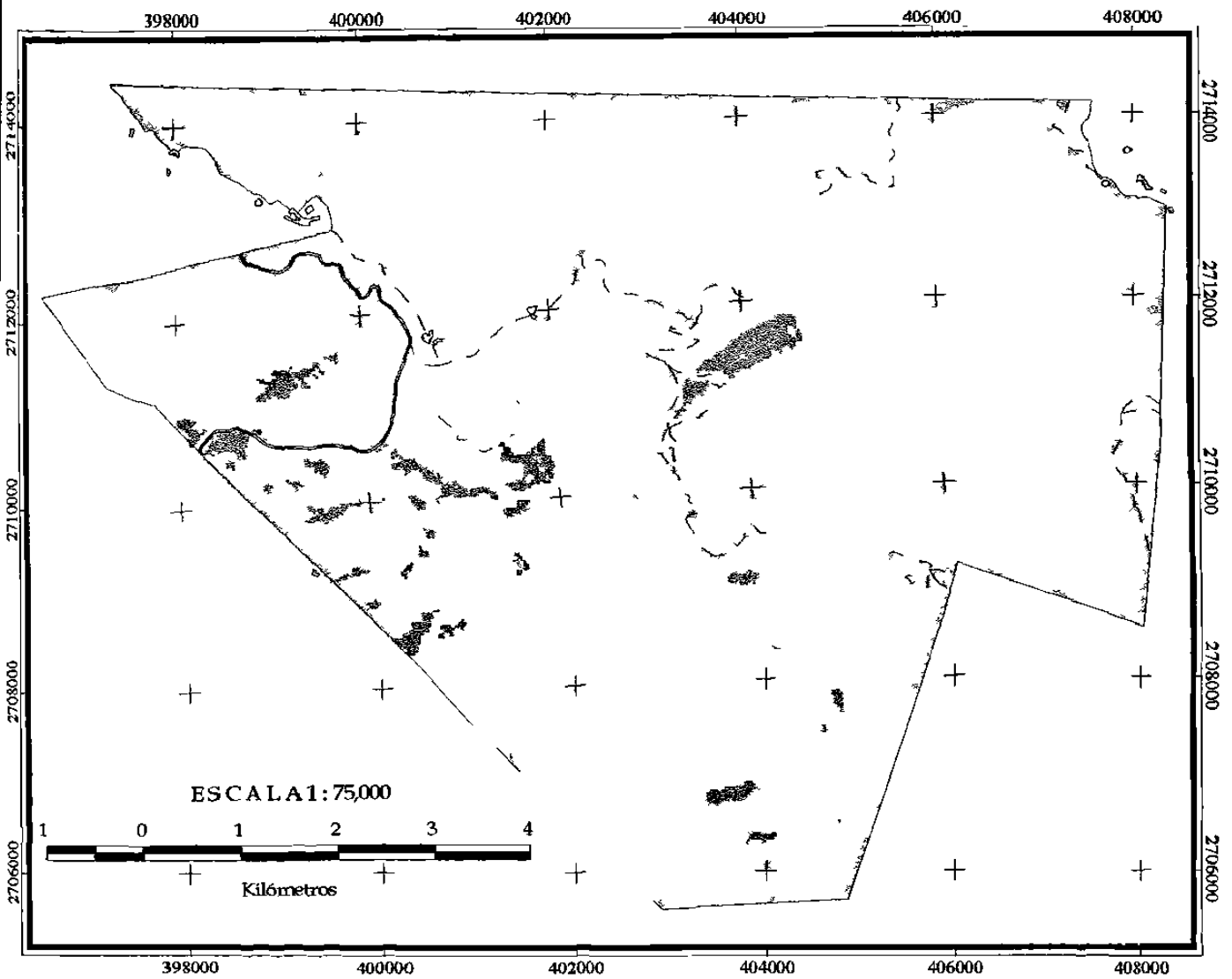


<b>S I M B O L O G I A</b>		Población	<b>L E Y E N D A</b>	<b>Grado de Peligro de Incendios Forestales</b>		<b>Áreas arboladas del Ejido Corona del Rosal</b>  <b>Peligro de Incendios Forestales para el mes de Abril</b>
		Ranchería			Muy bajo	
		Límite del Ejido			Bajo	
		Brecha			Medio	
		Carretera			Alto	
		Vereda			Muy alto	

Fuente: Elaboración propia a partir del análisis de variables topográficas, meteorológicas, combustibles forestales y rasgos socioeconómicos

Proyección Transversal de Mercator  
Esferoide de Clarke de 1866  
Sistema de Coordenadas UTM

Mapa 9. Distribución del Peligro de Incendios Forestales para el mes de Abril



**S  
I  
M  
B  
O  
L  
O  
G  
I  
A**

	Población
	Ranchería
	Límite del Ejido
	Brecha
	Carretera
	Vereda

**L  
E  
Y  
E  
N  
D  
A**

	Muy bajo
	Bajo
	Medio
	Alto
	Muy alto

Áreas arboladas del Ejido Corona del Rosal

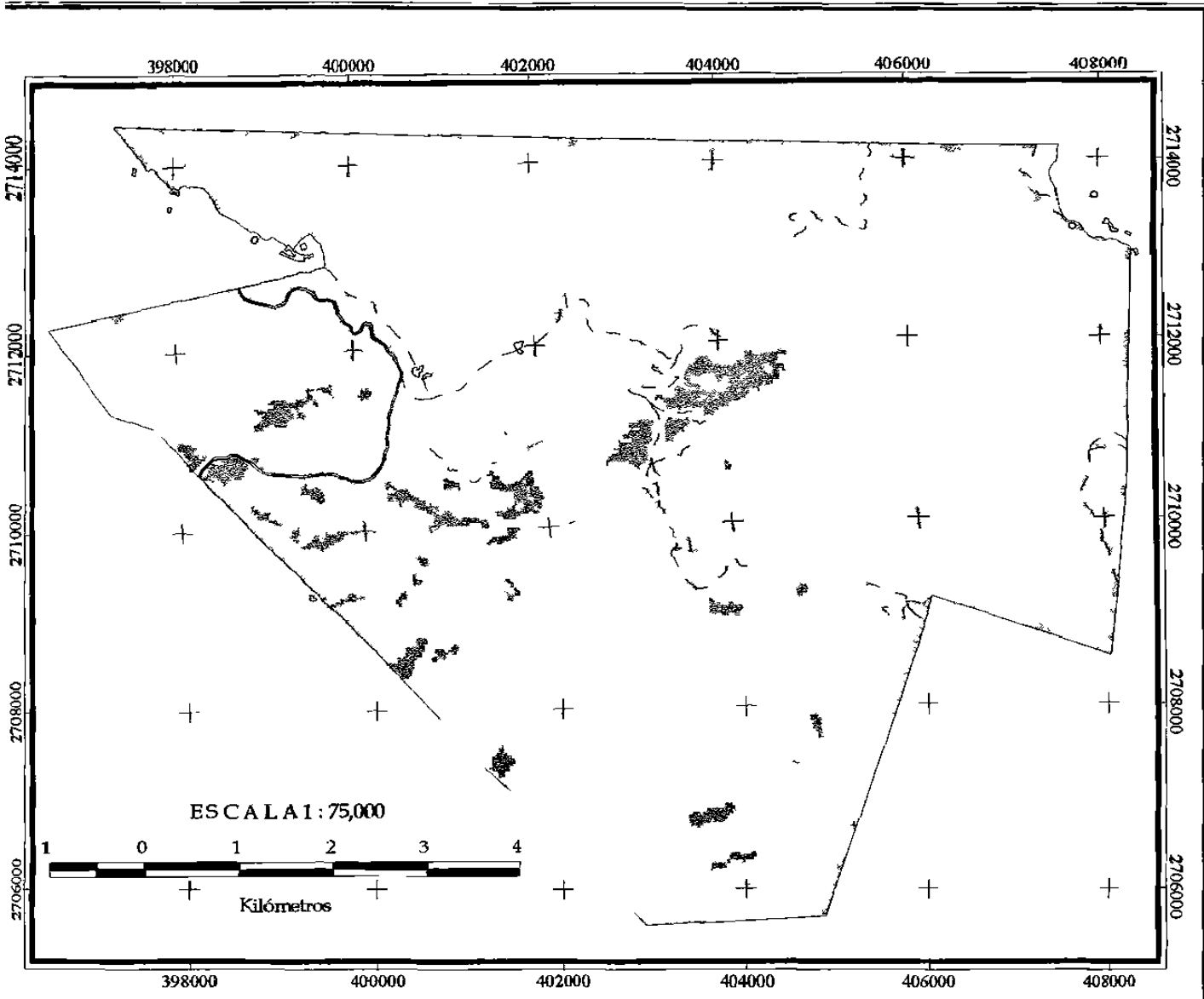
**Peligro de Incendios Forestales para el mes de Mayo**

Fuente: Elaboración propia a partir del análisis de variables topográficas, meteorológicas, combustibles forestales y rasgos socioeconómicos

Proyección Transversal de Mercator  
Esferoide de Clarke de 1866  
Sistema de Coordenadas UTM

Mapa 10. Distribución del Peligro de Incendios Forestales para el mes de Mayo



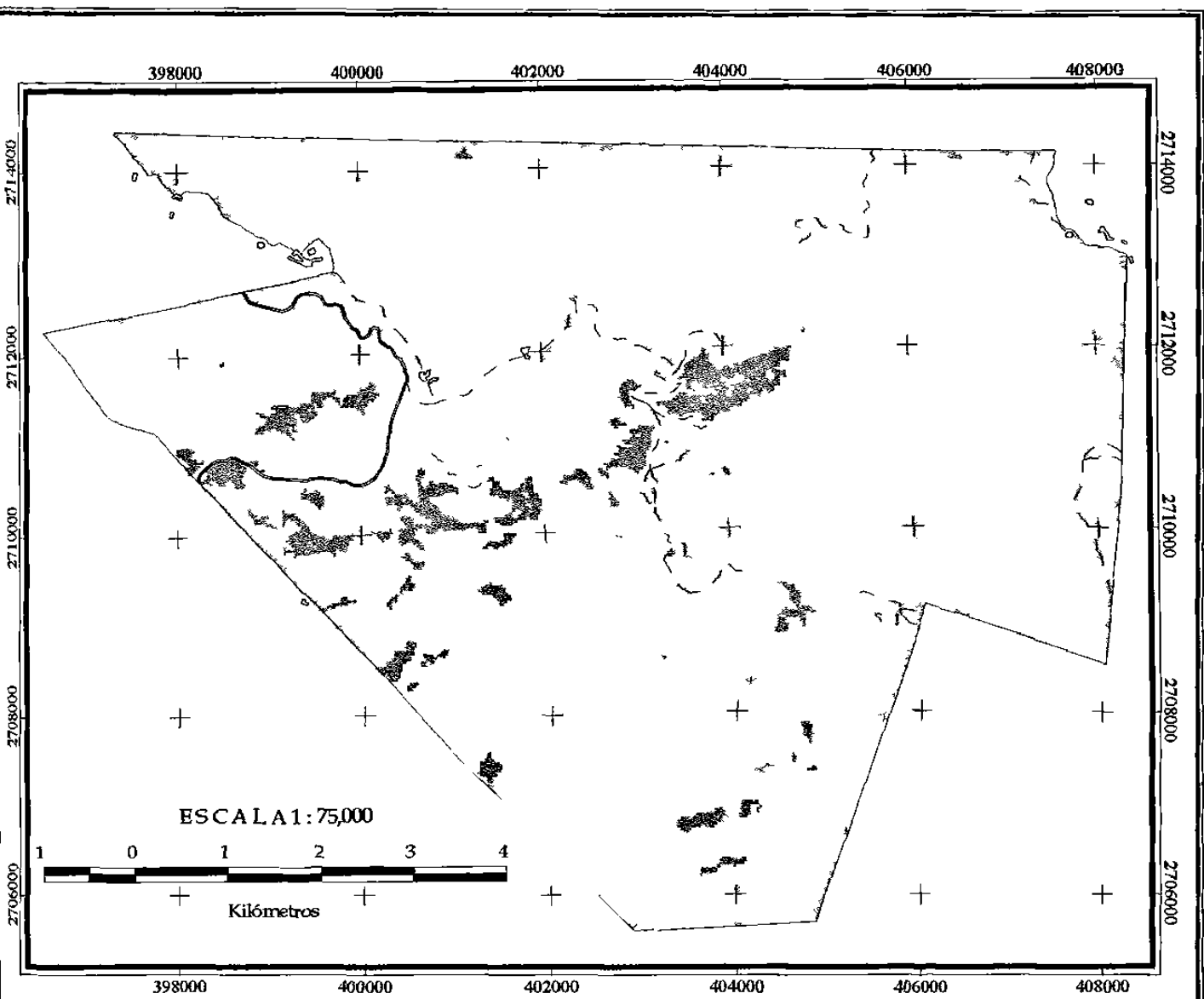


<b>S I M B O L O G I A</b>		Población	<b>L E Y E N D A</b>		Muy bajo	<b>Áreas arboladas del Ejido Corona del Rosal</b> <b>Peligro de Incendios Forestales</b> <b>para el mes de Junio</b>
		Ranchería			Bajo	
		Límite del Ejido			Medio	
		Brecha			Alto	
		Carretera			Muy alto	
		Vereda				

Fuente: Elaboración propia a partir del análisis de variables topográficas, meteorológicas, combustibles forestales y rasgos socioeconómicos

Proyección Transversal de Mercator  
 Esferoide de Clarke de 1866  
 Sistema de Coordenadas UTM

Mapa 11. Distribución del Peligro de Incendios Forestales para el mes de Junio

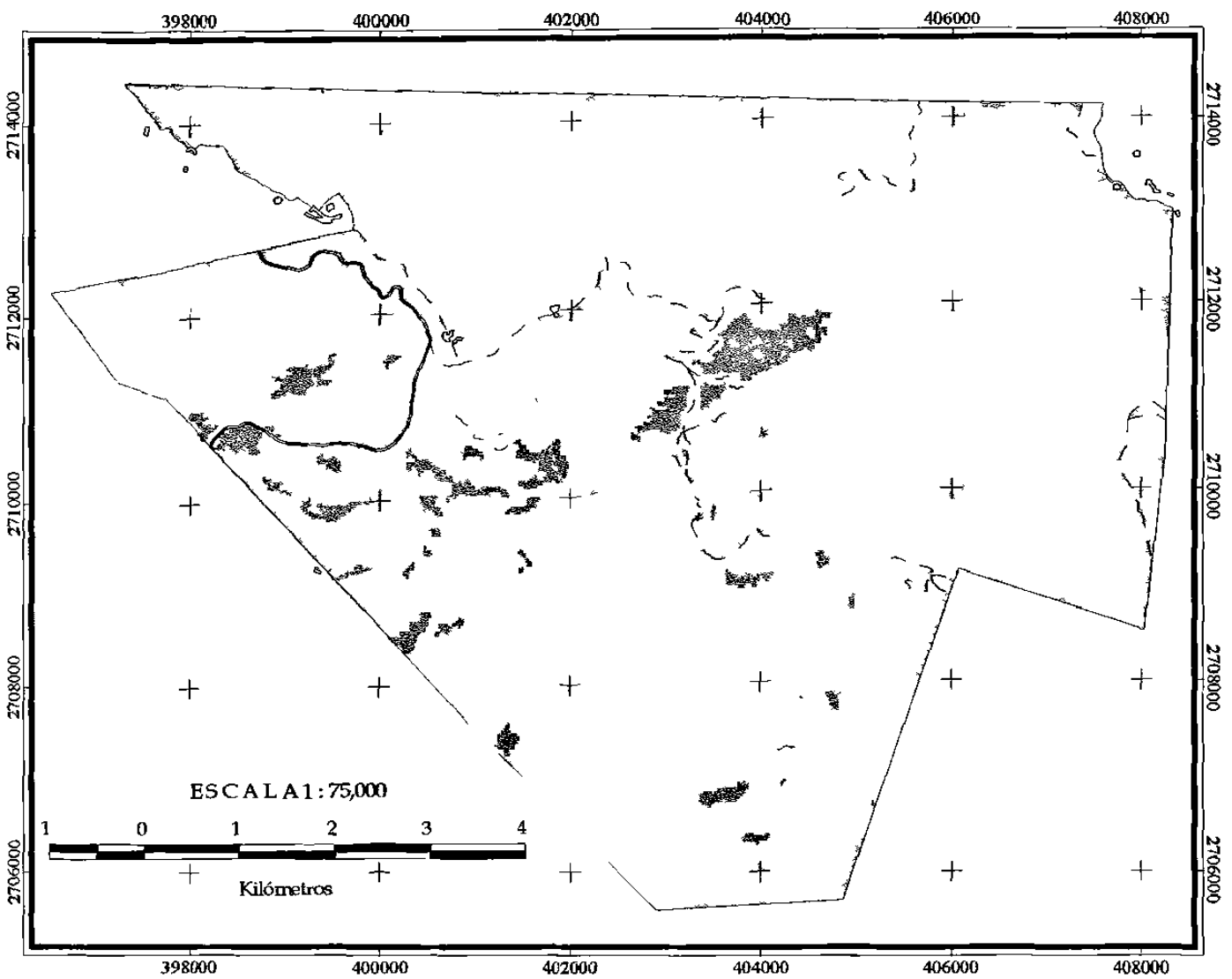


<b>S I M B O L O G I A</b>	Población	<b>L E Y E N D A</b>	Grado de Peligro de Incendios Forestales		Áreas arboladas del Ejido Corona del Rosal <b>Peligro de Incendios Forestales para el mes de Julio</b>
	Ranchería		Muy bajo	Bajo	
	Límite del Ejido		Medio	Alto	
	Brecha		Muy alto		
	Carretera				
	Vereda				

Fuente: Elaboración propia a partir del análisis de variables topográficas, meteorológicas, combustibles forestales y rasgos socioeconómicos

Proyección Transversal de Mercator  
Esferoide de Clarke de 1866  
Sistema de Coordenadas UTM

Mapa 12. Distribución del Peligro de Incendios Forestales para el mes de Julio



**S  
I  
M  
B  
O  
L  
O  
G  
I  
A**

	Población
	Ranchería
	Límite del Ejido
	Brecha
	Carretera
	Vereda

**L  
E  
Y  
E  
N  
D  
A**

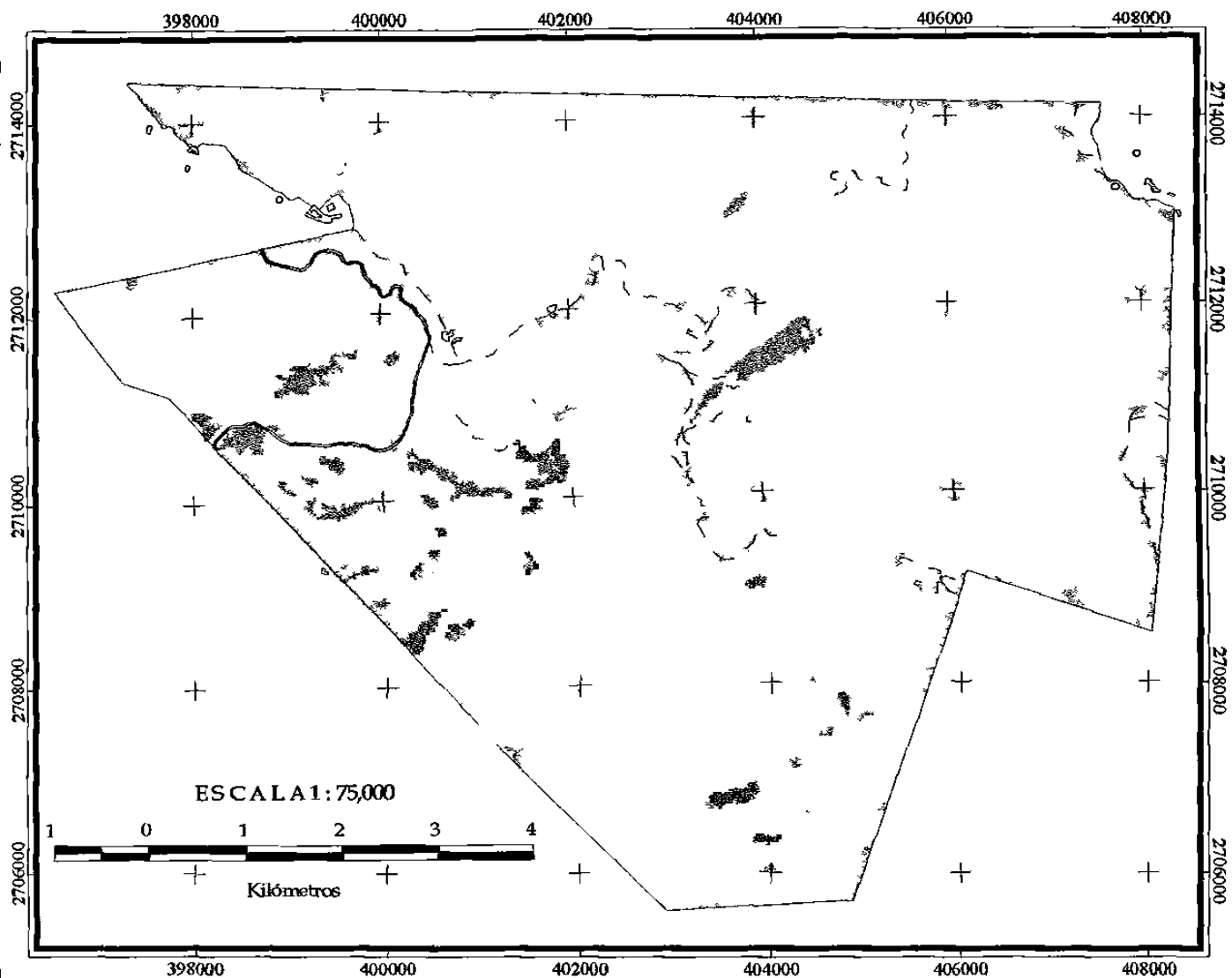
	Muy bajo
	Bajo
	Medio
	Alto
	Muy alto

Áreas arboladas del Ejido Corona del Rosal  
**Peligro de Incendios Forestales para el mes de Agosto**

Fuente: Elaboración propia a partir del análisis de variables topográficas, meteorológicas, combustibles forestales y rasgos socioeconómicos

Proyección Transversal de Mercator  
 Esferoide de Clarke de 1866  
 Sistema de Coordenadas UTM

Mapa 13. Distribución del Peligro de Incendios Forestales para el mes de Agosto

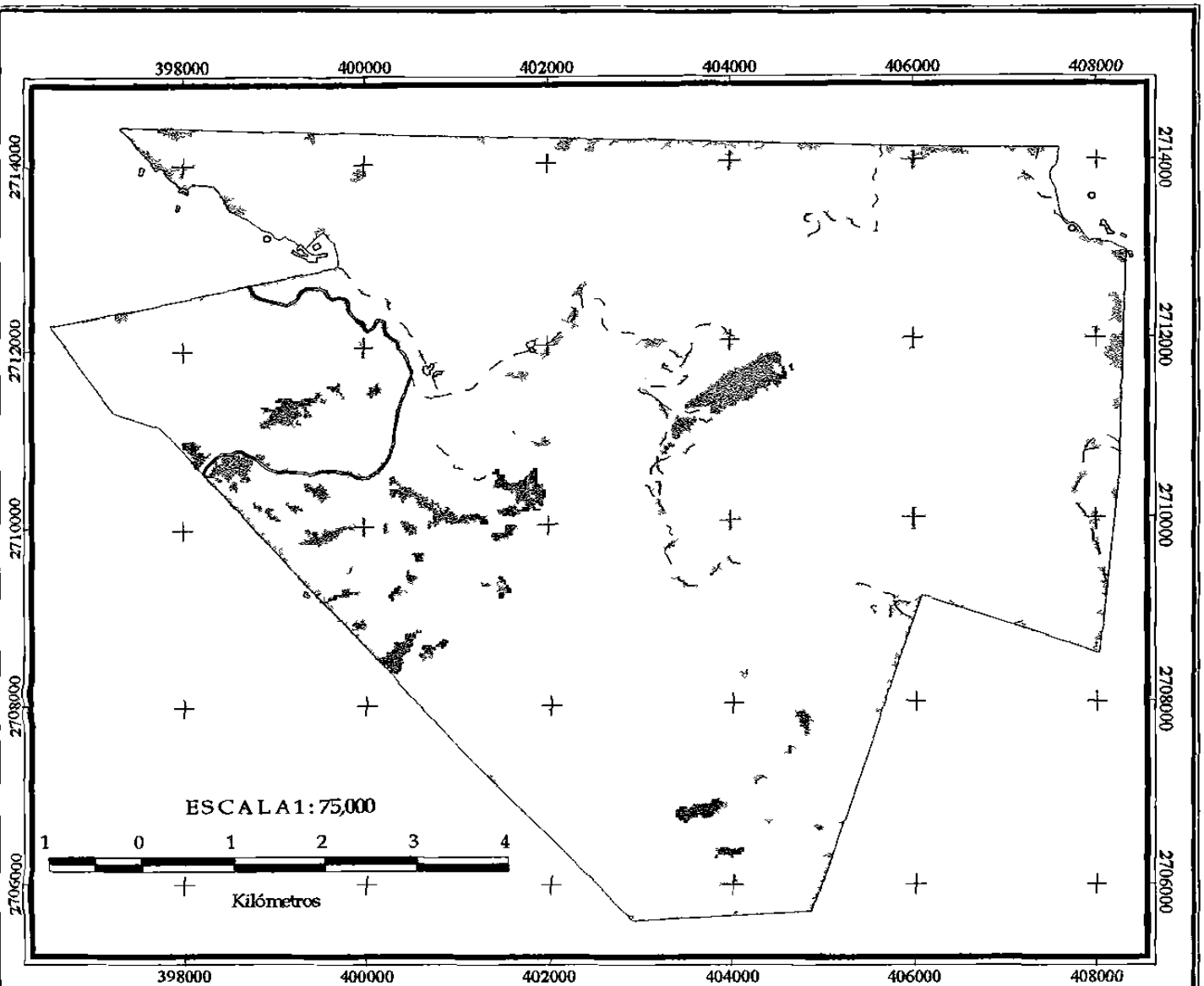


<b>S I M B O L O G I A</b>		Población	<b>L E Y E N D A</b>		Muy bajo	<b>Áreas arboladas del Ejido Corona del Rosal</b>  <b>Peligro de Incendios Forestales para el mes de Septiembre</b>
		Ranchería			Bajo	
		Límite del Ejido			Medio	
		Brecha			Alto	
		Carretera			Muy alto	
		Vereda				

Fuente: Elaboración propia a partir del análisis de variables topográficas, meteorológicas, combustibles forestales y rasgos socioeconómicos

Proyección Transversal de Mercator  
 Esferoide de Clarke de 1866  
 Sistema de Coordenadas UTM

Mapa 14. Distribución del Peligro de Incendios Forestales para el mes de Septiembre



**S  
I  
M  
B  
O  
L  
O  
G  
I  
A**

- Población
- Ranchería
- Límite del Ejido
- Brecha
- Carretera
- Vereda

**L  
E  
Y  
E  
N  
D  
A**

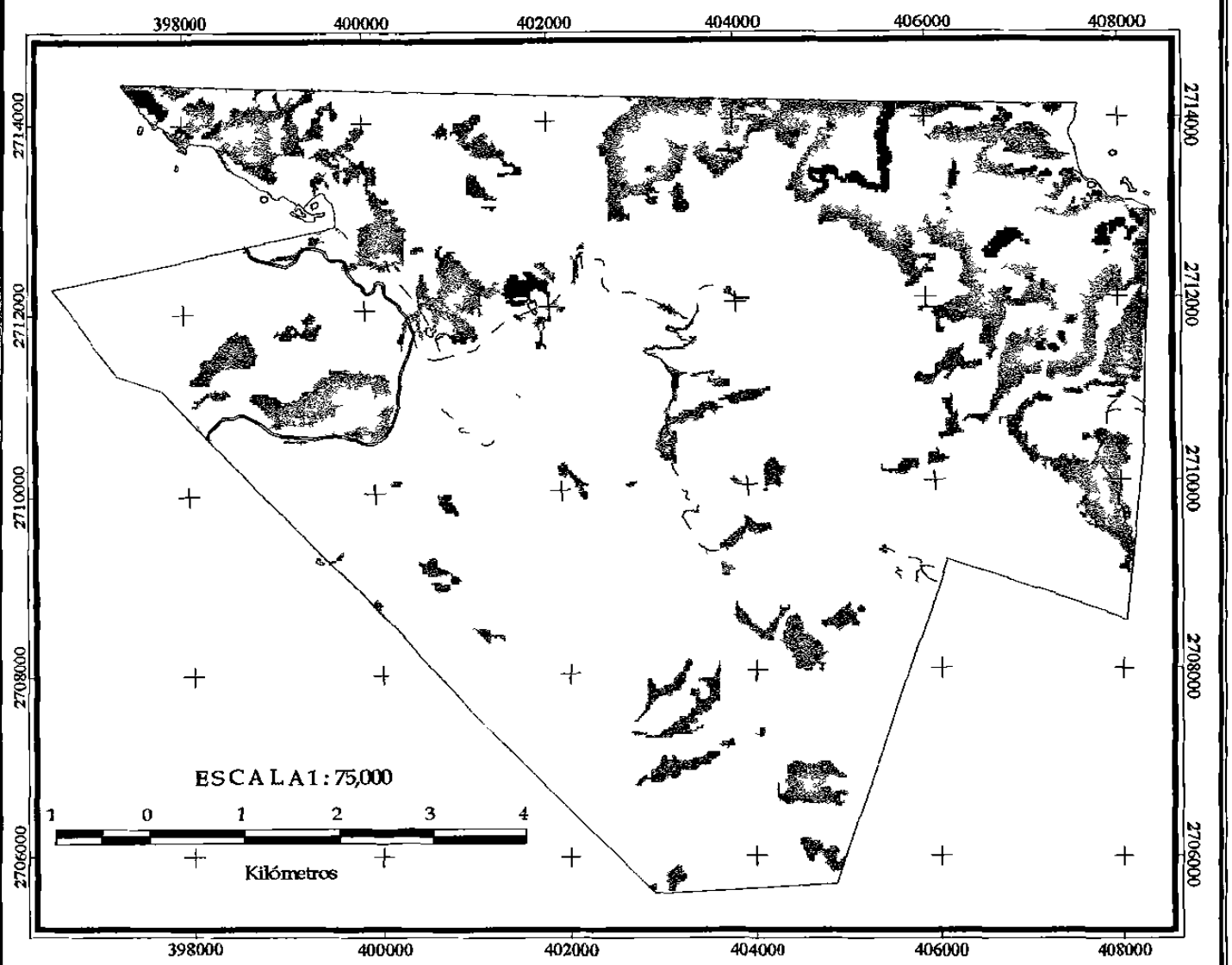
- Grado de Peligro de Incendios Forestales
- Muy bajo
  - Bajo
  - Medio
  - Alto
  - Muy alto

Áreas arboladas del Ejido Corona del Rosal  
**Peligro de Incendios Forestales para el mes de Octubre**

Fuente: Elaboración propia a partir del análisis de variables topográficas, meteorológicas, combustibles forestales y rasgos socioeconómicos

Proyección Transversal de Mercator  
Esferoide de Clarke de 1866  
Sistema de Coordenadas UTM

Mapa 15. Distribución del Peligro de Incendios Forestales para el mes de Octubre



**S I M B O L O G I A**

	Población
	Ranchería
	Límite del Ejido
	Brecha
	Carretera
	Vereda

**L E Y E N D A**

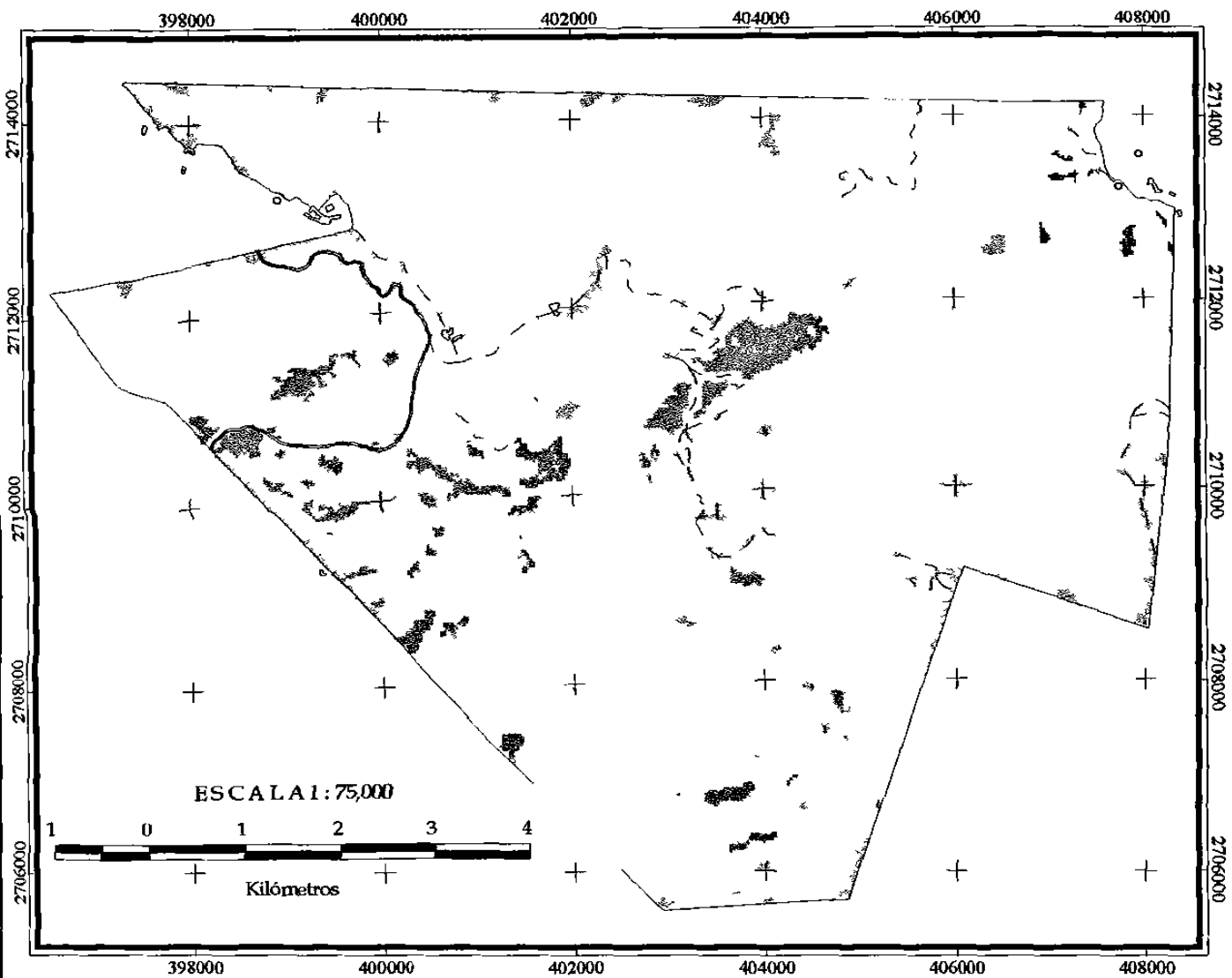
Grado de Peligro de Incendios Forestales	
	Muy bajo
	Bajo
	Medio
	Alto
	Muy alto

Áreas arboladas del Ejido Corona del Rosal  
**Peligro de Incendios Forestales para el mes de Noviembre**

Fuente: Elaboración propia a partir del análisis de variables topográficas, meteorológicas, combustibles forestales y rasgos socioeconómicos

Proyección Transversal de Mercator  
 Esferoide de Clarke de 1866  
 Sistema de Coordenadas UTM

Mapa 16. Distribución del Peligro de Incendios Forestales para el mes de Noviembre



<b>S I M B O L O G I A</b>	Población	<b>L E Y E N D A</b>	<b>Grado de Peligro de Incendios Forestales</b>		<b>Áreas arboladas del Ejeido Corona del Rosal</b>  <b>Peligro de Incendios Forestales para el mes de Diciembre</b>
	Ranchería		Muy bajo	Bajo	
	Límite del Ejeido		Medio	Alto	
	Brecha		Alto	Muy alto	
	Carretera				
	Vereda				

Fuente: Elaboración propia a partir del análisis de variables topográficas, meteorológicas, combustibles forestales y rasgos socioeconómicos

Proyección Transversal de Mercator  
 Esferoide de Clarke de 1866  
 Sistema de Coordenadas UTM

Mapa 17. Distribución del Peligro de Incendios Forestales para el mes de Diciembre

