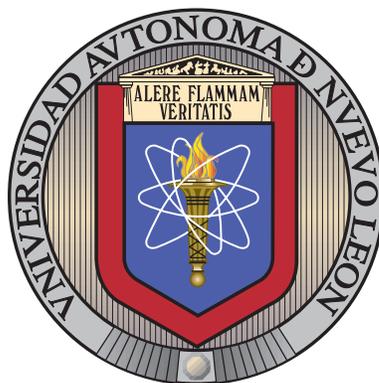


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



UN MARCO INTEGRADO PARA EL CONTROL Y  
GESTIÓN DE INCENDIOS FORESTALES

POR

MINERVA AIDEE DÍAZ ROMERO

EN OPCIÓN AL GRADO DE

MAESTRÍA EN CIENCIAS

EN INGENIERÍA DE SISTEMAS

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN

ABRIL 2011

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



UN MARCO INTEGRADO PARA EL CONTROL Y  
GESTIÓN DE INCENDIOS FORESTALES

POR

MINERVA AIDEE DÍAZ ROMERO

EN OPCIÓN AL GRADO DE

MAESTRÍA EN CIENCIAS

EN INGENIERÍA DE SISTEMAS

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN

ABRIL 2011

**Universidad Autónoma de Nuevo León**  
**Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica**  
**División de Estudios de Posgrado**

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la Tesis «Un marco integrado para el control y gestión de incendios forestales», realizada por la alumna Minerva Aidee Díaz Romero, con número de matrícula 1506785, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestría en Ciencias en Ingeniería de Sistemas.

El Comité de Tesis

---

Dr. Roger Z. Ríos Mercado

Asesor

---

Dr. Francisco Rodríguez y Silva

Revisor

---

Dra. Ada M. Álvarez Socarrás

Revisor

Vo. Bo.

---

Dr. Moisés Hinojosa Rivera

Subdirector

División de Estudios de Posgrado

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, Abril 2011

# ÍNDICE GENERAL

---

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Resumen</b>  | <b>xI</b> |
| <b>1. Introducción</b>  | <b>1</b>  |
| 1.1. Descripción del problema . . . . .                                     | 2         |
| 1.2. Objetivos . . . . .  | 4         |
| 1.3. Relevancia del problema . . . . .                                      | 5         |
| 1.4. Estructura de la tesis . . . . .                                       | 12        |
| <b>2. Antecedentes</b>  | <b>14</b> |
| 2.1. Introducción a incendios forestales . . . . .                          | 14        |
| 2.1.1. Factores ambientales . . . . .                                       | 16        |
| 2.2. Sistemas de información geográfica . . . . .                           | 22        |
| 2.2.1. Introducción . . . . .   | 22        |
| 2.2.2. Información geográfica y cartografía digital . . . . .               | 23        |
| 2.2.3. Formatos vectorial y ráster . . . . .                                | 23        |
| 2.3. Problema de localización de plantas de máxima cobertura . . . . .      | 24        |
| 2.4. Modelos de optimización en la gestión de recursos forestales . . . . . | 26        |
| 2.4.1. Investigación de operaciones en gestión forestal . . . . .           | 27        |
| 2.4.2. Investigación de operaciones en Incendios forestales . . . . .       | 29        |

---

|   |           |
|---|-----------|
| <b>3. Planteamiento del problema</b>  | <b>35</b> |
| 3.1. Descripción del problema y supuestos . . . . .   | 35        |
| 3.2. Modelo matemático . . . . .  | 36        |
| 3.2.1. Definición de puntos . . . . .   | 38        |
| 3.2.2. Índice de Peligro potencial de incendios forestales . . . . .  | 39        |
| 3.2.3. Índice de dificultad para la extinción . . . . .   | 42        |
| 3.2.4. Índice de prioridad de defensa . . . . .   | 43        |
| <b>4. Metodología de solución</b>   | <b>45</b> |
| 4.1. Preprocesamiento . . . . .   | 47        |
| 4.1.1. Creación de mapas . . . . .  | 47        |
| 4.1.2. Clasificación del área por índice de prioridad de defensa . . . . .                                    | 49        |
| 4.1.3. Generación de puntos de demanda y puntos potenciales de<br>ubicación de vehículos extintores . . . . . | 50        |
| 4.2. Procesamiento . . . . .  | 58        |
| 4.3. Postprocesamiento . . . . .  | 59        |
| <b>5. Resultados computacionales</b>  | <b>62</b> |
| 5.1. Objetivos . . . . .  | 62        |
| 5.2. Caso de estudio . . . . .  | 62        |
| 5.3. Ambiente de desarrollo . . . . .   | 65        |
| 5.4. Generación de escenarios de prueba . . . . .   | 66        |
| 5.5. Cálculo del Índice de peligro potencial de incendios . . . . .   | 67        |
| 5.6. Cálculo del Índice de dificultad de extinción . . . . .  | 68        |
| 5.7. Experimento C: Índice de prioridad de defensa (Ipd). . . . .   | 70        |

---

|  |            |
|--|------------|
| 5.8. Experimento D: Aplicación de la metodología al caso de estudio bajo diferentes condiciones meteorológicas . . . . . | 71         |
| <b>6. Conclusiones y consideraciones finales</b>   | <b>78</b>  |
| 6.1. Conclusiones . . . . .  | 79         |
| 6.2. Contribuciones . . . . .  | 79         |
| 6.3. Trabajo a futuro . . . . .  | 80         |
| <b>A. Modelos de combustible</b>   | <b>86</b>  |
| A.1. Modelos Rothermel . . . . .   | 86         |
| A.2. Modelos de estudio . . . . .  | 89         |
| <b>B. Índice de peligro potencial de incendios</b>   | <b>91</b>  |
| B.1. Formulación Índice de peligro . . . . .   | 91         |
| B.1.1. Determinación del subíndice de ignición . . . . .   | 91         |
| B.1.2. Determinación del subíndice de comportamiento dinámico . . . . .  | 96         |
| B.1.3. Determinación del subíndice de comportamiento energético . . . . .  | 97         |
| B.2. Formulación índice de dificultad de extinción . . . . .   | 98         |
| <b>C. Manual de usuario</b>  | <b>102</b> |
| C.1. Índice de Prioridad de defensa . . . . .  | 102        |
| C.2. Reportes . . . . .  | 104        |
| C.3. Modelación matemática . . . . .   | 105        |

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

|  |    |
|--|----|
| 1.1. Clasificación de la zona por tipo de vegetación. . . . .  | 3  |
| 1.2. Ejemplo de combustible en un bosque de coníferas (Reserva de la Biosfera El Cielo, Tamaulipas). . . . . | 4  |
| 1.3. Hectáreas afectadas por año en el periodo 1998-2009. . . . .  | 8  |
| 1.4. Indicadores de tiempo de eficacia para el combate de incendios del periodo 1998-2009 . . . . .          | 8  |
| 1.5. Duración de los incendios del periodo de 1998-2009 . . . . .  | 9  |
| 1.6. Tamaño de los incendios del año 2009 . . . . .  | 10 |
| 2.1. Porcentaje de causas de incendios forestales en el periodo 1998-2008 .                                  | 15 |
| 2.2. Triángulo del fuego. . . . .  | 19 |
| 3.1. Puntos de demanda . . . . .   | 39 |
| 4.1. Diagrama de flujo de la metodología implementada . . . . .  | 46 |
| 4.2. Mapa digital . . . . .  | 47 |
| 4.3. Clasificación por el porcentaje de pendiente . . . . .  | 49 |
| 4.4. Mapa de riesgo . . . . .  | 50 |
| 4.5. Mapa de riesgo por importancia de la zona . . . . .   | 52 |
| 4.6. Malleo del mapa de riesgo . . . . .   | 53 |

---

|   |     |
|---|-----|
| 4.7. Puntos de demanda . . . . .  | 55  |
| 4.8. Ilustración de una solución óptima a través del visualizador . . . . .                     | 60  |
| 4.9. Secuencia de la metodología de solución . . . . .  | 61  |
| 5.1. Mapa del área de estudio . . . . .   | 63  |
| 5.2. Etapas de construcción del mapa vegetación. . . . .  | 64  |
| 5.3. Etapas de construcción del mapa de pendientes. . . . .                                     | 64  |
| 5.4. Índice de peligro potencial, escenario 3 . . . . .   | 68  |
| 5.5. Índice de peligro potencial para condiciones meteorológicas desfavorables . . . . .        | 69  |
| 5.6. Mapas de Índice de prioridad de defensa, escenarios 3 y 6 . . . . .                        | 71  |
| 5.7. Mapas de puntos de demanda para escenarios 7 y 2 . . . . .                                 | 73  |
| 5.8. Variación de la función objetivo para el escenario 3 . . . . .                             | 75  |
| 5.9. Variación de la función objetivo para el escenario 2 . . . . .                             | 76  |
| 5.10. Comparación de puntos no cubiertos y número de brigadas colocadas (Escenario 2) . . . . . | 77  |
| C.1. Interfaz de pantalla de Inicio del programa . . . . .                                      | 103 |
| C.2. Interfaz datos de entrada . . . . .  | 103 |
| C.3. Interfaz datos de entrada y datos de salida . . . . .                                      | 104 |
| C.4. Interfaz de la selección del reporte . . . . .   | 104 |
| C.5. Interfaz del apartado de modelación matemática . . . . .                                   | 105 |

# ÍNDICE DE TABLAS

---

|  |    |
|--|----|
| 2.1. Revisión bibliográfica acerca de problemas relacionados con la investigación de operaciones en problemas de gestión de recursos forestales  | 30 |
| 2.3. Revisión bibliográfica acerca de problemas relacionados con la investigación de operaciones en problemas de gestión de incendios forestales | 34 |
| 3.1. Tiempo límite de las clases . . . . .   | 38 |
| 3.2. Distancia máxima de los puntos de demanda . . . . .   | 39 |
| 3.3. Clasificación del índice de prioridad de defensa . . . . .  | 44 |
| 4.1. Densidad vial que pueden cubrir puntos de demanda según el tiempo permitido . . . . .   | 57 |
| 5.1. Escenarios de prueba para diferentes condiciones meteorológicas. . . .  | 66 |
| 5.2. Índice de peligro potencial, según diferentes condiciones meteorológicas  | 67 |
| 5.3. Índice de dificultad de extinción, según diferentes condiciones meteorológicas . . . . .  | 69 |
| 5.4. Índice de prioridad de defensa, según diferentes condiciones meteorológicas . . . . .   | 71 |
| 5.5. Puntos de demanda según su índice de peligro potencial . . . . .  | 72 |
| 5.6. Porcentaje de puntos de demanda cubiertos, 7 brigadas . . . . .   | 74 |
| 5.7. Desempeño de instancia 3 con diferente número de brigadas . . . . .   | 75 |

---

|   |     |
|---|-----|
| 5.8. Desempeño de instancia 2 con diferente número de brigadas . . . . .  | 76  |
| A.1. Clasificación de los modelos de combustible . . . . .  | 87  |
| A.2. Modelos de combustible del estado de Chiapas . . . . .   | 90  |
| B.1. Probabilidad de ignición (Estimación de la probabilidad de que una<br>brasa, al caer sobre el combustible pueda inflamarlos) . . . . . | 92  |
| B.2. Humedad relativa del combustible . . . . .   | 93  |
| B.3. Factor de corrección de humedad del combustible (meses mayo - junio<br>- julio) . . . . .  | 94  |
| B.4. Factor de corrección de humedad del combustible (meses mayo - junio<br>- julio) . . . . .  | 94  |
| B.5. Valores de coeficiente de ignición característico de cada uno de los tipos<br>de modelos de combustible Rothermel . . . . .            | 95  |
| B.6. Coeficiente de ignición de los modelos de combustible de Chiapas. . .  | 96  |
| B.7. Asignación de pesos para la determinación del comportamiento dinámi-<br>co en función de la velocidad de propagación . . . . .         | 97  |
| B.8. Asignación de pesos para la determinación del subíndice de compor-<br>tamiento energético . . . . .                                    | 98  |
| B.9. Asignación de pesos según longitud de carretera . . . . .  | 100 |
| B.10. Asignación de pesos según rendimiento por persona en apertura de<br>líneas de defensa con herramientas manuales m/hora. . . . .       | 101 |
| B.11. Ajuste según el tipo de pendiente. . . . .  | 101 |

# RESUMEN

---

Minerva Aidee Díaz Romero.

Candidato para el grado de Maestría en Ciencias en Ingeniería de Sistemas

Universidad Autónoma de Nuevo León.

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.

Título del estudio:

## UN MARCO INTEGRADO PARA EL CONTROL Y GESTIÓN DE INCENDIOS FORESTALES

Número de páginas: 106.

**OBJETIVOS Y MÉTODO DE ESTUDIO:** El presente trabajo de tesis está enfocado a una problemática real proveniente de los incendios forestales en México. El objetivo de esta tesis es desarrollar una metodología solución para el problema de cómo ubicar brigadas de ataque a incendios con el fin de maximizar el área protegida dada las diferentes clases de la misma, es decir, maximizar la suma ponderada de la cantidad de recursos disponibles para la región, respetando el tiempo límite de llegada de los recursos para extinguir el fuego. Los recursos distribuidos deben cubrir la mayor cantidad del área geográfica que fue previamente clasificada por su nivel de importancia. El modelo matemático es tomado de la literatura y adecuado a nuestro problema.

Esta metodología consta de tres fases: preprocesamiento, procesamiento y post-procesamiento. La primera fase consiste en calcular los índices de peligro potencial de incendios y de dificultad de extinción, ya que éstos son los que permiten clasificar el área geográfica y por consecuencia en base a esta información generar los puntos de demanda. La fase de procesamiento resuelve el modelo matemático asociado al problema de ubicación de brigadas por medio del método de ramificación y acotamiento. Finalmente la etapa de posprocesamiento muestra de manera visual la solución de asignación de recursos.

CONTRIBUCIONES Y CONCLUSIONES: La principal contribución de este trabajo es el desarrollo de una herramienta que integra la metodología del cálculo de índices de peligros, así como la toma de decisiones de ubicación de brigadas. Se ilustra el funcionamiento de la misma en un caso estudio en el estado de Chiapas. Hasta donde se tiene conocimiento, éste es el primer trabajo que presenta de manera integrada el cálculo de estos índices, así como también la optimización de ubicación de recursos para el estudio de incendios forestales.

La herramienta desarrollada permite el calculo de diferentes índices importantes en el comportamiento del fuego, mediante datos dinámicos o históricos, para diferentes épocas del año y diferentes horas de estudio. Una aportación importante es el procesador de mapas según los diferentes índices del comportamiento del fuego. Se ha creado un generador de instancias tomando como entrada los mapas de índice de peligro. Se ha dado solución al modelo matemático para la distribución de brigadas a un caso de estudio del estado de Chiapas. Otra aportación es la creación de un módulo en la herramienta que muestra gráficamente la solución de la distribución de brigadas.

Firma del asesor: \_\_\_\_\_

Dr. Roger Z. Ríos Mercado

## CAPÍTULO 1

# INTRODUCCIÓN

---

Un incendio forestal se entiende como la propagación libre y no programada del fuego sobre la vegetación en los bosques, selvas y zonas áridas y semiáridas. En este sentido, el fuego es la liberación y desprendimiento de energía en forma de luz y calor producido por la combustión de vegetación forestal cuya ignición no estaba prevista, lo que obliga a realizar su extinción.

Los incendios forestales se han identificado también como el producto de la interacción de las condiciones climatológicas imperantes, así como de las características de los combustibles vegetales, pudiendo estar vivos o muertos (plantas y leña respectivamente) y de un agente de ignición, ya sea de origen natural o antropogénico. La intensidad y velocidad de dispersión del incendio está en función de la cantidad y contenido de humedad de los combustibles vegetales, la velocidad del viento y pendiente del terreno [29].

La implementación inicial de ataque para la extinción de incendios en los días previos de ocurrencia de incendios es una parte importante de la planificación de incendios forestales. Cuando los incendios se producen, los recursos para extinguir incendios son enviados para lograr evitar la propagación del fuego. Desde hace tiempo se reconoce que un rápido ataque inicial a un incendio forestal dentro de un plazo establecido evita que el fuego pueda causar importantes daños. Al mismo tiempo, la mayoría de los administradores de incendios se ven limitados en cuanto a los recursos para el ataque inicial. La implementación de modelos de optimización ha demostrado apoyar a la toma de decisiones, por lo tanto éstos se podrían usar para distribuir de

manera eficiente los recursos.

Los responsables del manejo forestal contra incendios deben decidir cuántos y qué tipo de medios de transporte (vehículos terrestres, helicópteros, aviones, etc) adquirir, el número de bomberos a contratar, y qué equipo de extinción de incendios debe comprar, con el objetivo de minimizar el costo de los recursos y al mismo tiempo satisfacer rápidamente las exigencias que varían a lo largo de una temporada de incendios. Dicha toma de decisiones se complica por el hecho de que la ocurrencia de incendios y la necesidad de medios de extinción de incendios es muy variable tanto en el tiempo como en el espacio. La mayoría de las organizaciones de gestión de incendios debe desplegar sus recursos para satisfacer las demandas diarias. Por lo tanto, no es sorprendente que muchos especialistas de investigación de operaciones hayan estudiado los problemas de planificación del manejo de incendios forestales en todo el mundo ya que éste es un problema de toma de decisiones de marcada relevancia [38].

La gestión de incendios forestales se ha visto en el desarrollo de varias metodologías de análisis basadas en técnicas de investigación operaciones, que sirven como herramientas para la creación de políticas. Esto se refleja en el número cada vez mayor de aplicaciones algunas de las cuales son discutidas por Gunn, Weintraub y Martell [39].

El objetivo del control de incendios forestales es la minimización del impacto negativo de los mismos. Ésto puede lograrse mediante la detección y ataque a los incendios poco después de que se informa o mediante el control de los incendios con eficacia.

## 1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La problemática a la que nos enfrentamos es que, dada una superficie geográfica, se desea clasificar según su riesgo potencial de incendios, teniendo como datos de entrada parámetros meteorológicos y datos de la superficie del terreno. Posterior-

mente se desea ubicar recursos para extinguir el fuego, dado los puntos de demanda y los puntos de ubicación potenciales, de manera que se maximice la cantidad de zona cubierta dado la importancia de la zona. La clasificación de la zona se basa en dos factores los cuales son: (a) tipo de vegetación y (b) el comportamiento operativo del fuego. La importancia de cubrir la mayor parte de puntos de demanda es poder atacar tan pronto como sea posible el fuego ya que entre más pequeño sea más fácil de extinguir. Además se tiene un número de recursos disponibles. El riesgo potencial de incendios no se conoce de antemano, más puede calcularse en base a parámetros meteorológicos y datos de la superficie del terreno [46].

La clasificación de la zona según el índice de peligro potencial depende de dos factores los cuales son:

a) Tipo de vegetación (ver Figura 1.1).

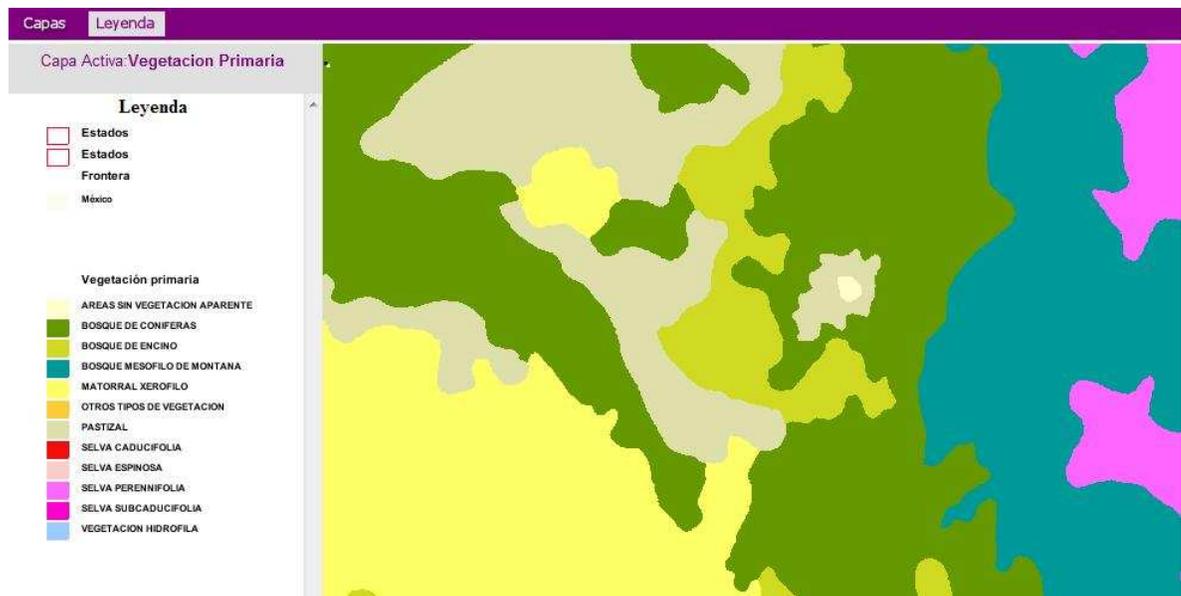


Figura 1.1: Clasificación de la zona por tipo de vegetación.

b) El comportamiento operativo, el cual depende de las condiciones del clima, terreno, pendiente, humedad y combustible (ver Figura 1.2).

La importancia de cubrir la mayor parte de puntos de demanda reside en poder atacar tan pronto como sea posible el fuego ya que entre más pequeño es



Figura 1.2: Ejemplo de combustible en un bosque de coníferas (Reserva de la Biosfera El Cielo, Tamaulipas).

más fácil de extinguir. Además, dado un número limitado de recursos disponibles, se pretende determinar la mejor manera posible de ubicarlos.

## 1.2 OBJETIVOS

Los objetivos principales de esta tesis son: Crear una herramienta que integre una metodología para adecuar un modelo propuesto en la literatura [11] que maximiza la suma ponderada de puntos de demanda que son cubiertos en un área protegida dadas las diferentes clases de la misma, respetando el número de recursos disponibles y el tiempo límite de llegada para extinguir el fuego (es variable para cada zona). El modelo que se utiliza es un modelo de programación entera que determina el despliegue de recursos de tal manera que cualquier incendio sea atacado dentro de un límite de tiempo especificado. Los recursos distribuidos deben cubrir la mayor cantidad del área geográfica que fue previamente clasificada por su nivel de importancia.

Ahora bien, para poder determinar con precisión las entradas al modelo de optimización, como por ejemplo obtener el conjunto de puntos de demanda, se requiere clasificar el área según su importancia. El índice de peligro potencial de ocurrencia de incendios nos permitirá determinar el peligro en función de la combustibilidad

de la vegetación existente, tanto viva como muerta y en función del relieve y de la influencia que la meteorología local ejerce sobre ella.

Se pretende ilustrar la valía de la herramienta con un caso estudio para el estado de Chiapas, en donde se generan diferentes escenarios y resuelven las instancias para cada uno de ellos. Con el cumplimiento de estos objetivos se logra aportar una herramienta valiosa para el apoyo de la toma de decisiones en el problema distribución de recursos abordado.

### 1.3 RELEVANCIA DEL PROBLEMA

Independientemente de su origen, un incendio forestal es un peligro inminente o daño para las personas, la propiedad, el clima, la morfología, los suelos, economía, sociedad y el ambiente. Se propaga sin control en terrenos rurales, a través de vegetación leñosa, arbustiva o herbácea, viva o muerta. Las condiciones climáticas imperantes, como altas temperaturas, baja humedad y viento, hacen que la zona se encuentre en un momento de máxima probabilidad de ocurrencia de incendios [8]. La gran mayoría de los incendios forestales son provocados por el hombre o por elementos, máquinas o instalaciones por él construidas.

Los incendios forestales son uno de los problemas ambientales más importantes que afectan a los ecosistemas forestales en México [44]. Para contrarrestar sus efectos nocivos, las dependencias de gobierno correspondientes han implementado una serie de actividades operativas encaminadas a tres rubros: control, prevención y restauración. Dentro de las medidas de prevención destaca la de ataque inicial, la cual consiste en disminuir tanto el riesgo como el efecto del fuego. No obstante, la aplicación de ataque inicial ha sido muy limitada en México.

Los incendios forestales son uno de los mayores problemas medioambientales que existen actualmente en nuestro país. Año tras año miles de hectáreas se ven afectadas por este problema. En nuestro país existe un Programa Nacional de Protección Contra Incendios Forestales (PNPCIF) que tiene por objetivo proteger los

recursos forestales de la presencia de incendios y atacar las causas que los originan.

#### OBJETIVOS ESPECÍFICOS DEL PROGRAMA NACIONAL DE PROTECCIÓN CONTRA INCENDIOS FORESTALES

- Disminuir la superficie afectada por el fuego.
- Detectar con oportunidad la presencia de los incendios.
- Reducir el tiempo de respuesta a estos fenómenos.
- Incrementar las acciones de prevención.
- Mantener una previsión climática constante y de los factores que desencadenan su presencia.
- Combatir y controlar los incendios.
- Asegurar la restauración de las áreas afectadas.

Entre más rápido se detectan los incendios forestales es mucho más fácil combatirlos y atacarlos cuando aún son pequeños. De esta manera se contribuye a disminuir la superficie afectada por el fuego. La herramienta que proponemos en este trabajo hace una importante aportación al PNPCIF en la mayoría de sus objetivos, como por ejemplo, ayuda a detectar a tiempo la presencia de los incendios, reducir el tiempo de respuesta a estos fenómenos.

Los incendios forestales han incrementado la atención en todo el mundo. En el lapso de los últimos 200 años, seis millones de kilómetros cuadrados se han perdido alrededor del mundo, principalmente por los incendios forestales [38]. Esto equivale a 6 veces la extensión del territorio nacional mexicano [13]. Cada temporada de incendios se pierden grandes masas forestales en todo el planeta. Se ha calculado una afectación anual a estos ecosistemas en más de 1043.6 de millones de hectáreas en promedio [14].

En México, en 1998 se registró la peor temporada de incendios forestales de nuestra historia, con cifras récord de 14,445 incendios forestales y una afectación de 849,632 hectáreas, y lo más grave, la pérdida de 71 vidas humanas. Como las condiciones climáticas y meteorológicas en 1998 eran de una intensa sequía, fuertes vientos y elevada temperatura, se propició inevitablemente una situación de alto riesgo. El fenómeno de El Niño, que tuvo lugar en 1997, propició diversas anomalías que desembocaron en una de las sequías más severas del siglo pasado [17].

Abatir incendios ha representado retos para todas las naciones, inclusive los países más desarrollados, que cuentan con tecnología y recursos económicos para adquirir medios de transporte especializados para abatir el fuego. No obstante, en ocasiones se han visto impotentes para impedirlos o reducirlos. Esto ha conducido a las instituciones y a la comunidad académica y científica a replantear varias cuestiones en torno a cuál debiera ser la mejor política institucional para resolver la problemática.

En nuestro país la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) [29], del 1 de enero al 10 de diciembre de 2009, ha registrado en total 9,542 incendios forestales en 32 entidades federativas, afectando una superficie de 298,467 hectáreas. Las entidades federativas con mayor número de incendios durante el 2009 fueron: Estado de México, Distrito Federal, Michoacán, Puebla, Tlaxcala, Chiapas, Hidalgo y Chihuahua, los cuales representan 75.13 % del total nacional. Las entidades federativas con mayor superficie afectada durante el año 2009 fueron: Baja California, Coahuila, Yucatán, Oaxaca, Zacatecas, Chiapas, Michoacán, Guerrero y Chihuahua que representan el 37.11 % del total nacional. Hemos elegido el estado de Chiapas como caso de estudio, ya que es uno de los estados con mayor número de incendios y mayor superficie afectada, según las estadísticas.

En la Figura 1.3, se muestran las hectáreas afectadas por incendios forestales en nuestro país del año 1998 al año 2009 [29]. Podemos observar que a partir de 1999 se disminuye drásticamente el número de hectáreas afectadas. Esto se debe a la cantidad alarmante de incendios en 1998 y al esfuerzo que se ha venido realizando

por parte de los grupos de combate en la lucha contra incendios.

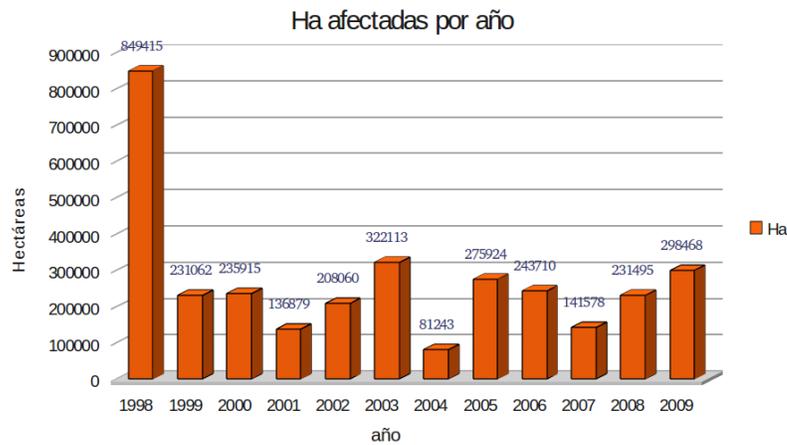


Figura 1.3: Hectáreas afectadas por año en el periodo 1998-2009.

En la Figura 1.4 se muestran los tiempos promedio en la detección, despliegue y combate a incendios a nivel nacional alcanzado y su correspondiente tiempo promedio en el periodo 1998-2009. Como puede apreciarse se muestra que el tiempo promedio en detectar un incendio es de 47 minutos, en llegar a atacarlo 1 hora con 14 minutos y la duración promedio es de 12 horas con 56 minutos, lo cual guarda una correlación con el tiempo que tardan en llegar las brigadas de combate al incendio [18].

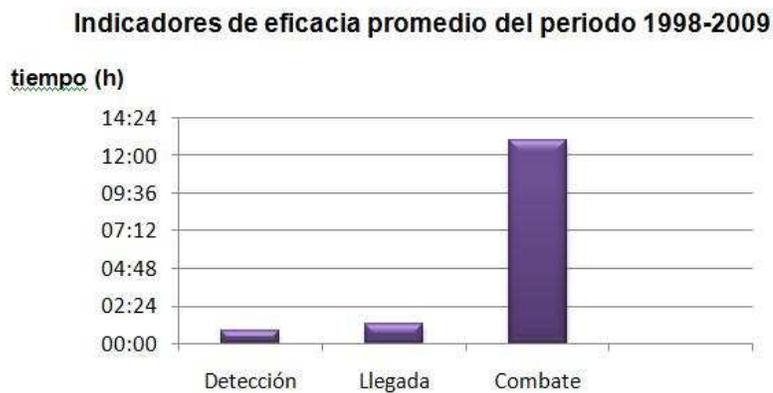


Figura 1.4: Indicadores de tiempo de eficacia para el combate de incendios del periodo 1998-2009

En los análisis efectuados respecto al tiempo de duración de los incendios registrados durante el periodo 1998-2009 (Figura 1.5) se identifica que el 82 % de los mismos tuvieron una duración menor o igual a un día, lo cual indica el gran esfuerzo que se viene realizando por parte de los grupos de combate en la lucha contra incendios.



Figura 1.5: Duración de los incendios del periodo de 1998-2009

Según los datos reportados en el periodo 1998-2009 que se muestra en la Figura 1.6. En ella se observa que el 66 % de los incendios forestales tuvieron un tamaño menor o igual a 20 ha. Los incendios forestales afectan de diferente forma a los diversos ecosistemas forestales, dependiendo de la intensidad y duración del fuego y de las mismas condiciones bajo las cuales se presenta, tanto atmosféricas como de suelo, topográficas o de la propia vegetación.

Los efectos causados por los incendios a los ecosistemas forestales tienen diversas manifestaciones y no necesariamente son negativas. Entre los efectos benéficos podemos mencionar que después de un incendio se propicia el rebrote de pasto tierno que sirve para alimentación del ganado y de la fauna silvestre, se facilita la germinación de las semillas de algunas especies de árboles, se abate el combustible ligero, y se controlan ciertas plagas, enfermedades y vegetación indeseables.

Existen ecosistemas dependientes del fuego. Los ecosistemas dependientes del fuego son aquéllos donde el fuego es esencial y las especies han desarrollado adaptaciones para responder positivamente al fuego y para facilitar su propagación, es

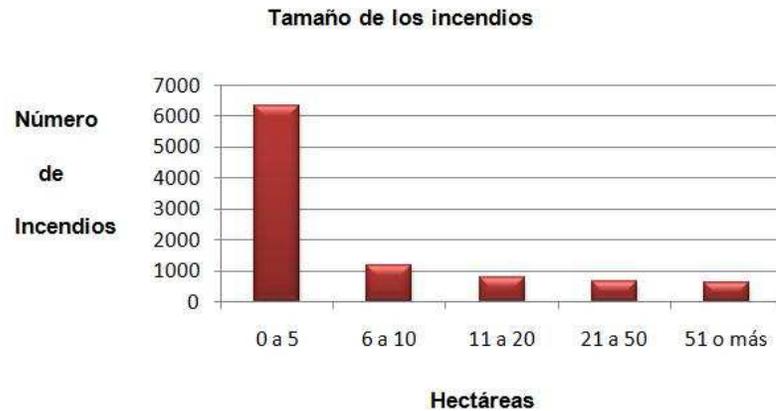


Figura 1.6: Tamaño de los incendios del año 2009

decir, la vegetación es inflamable y propensa al fuego [5]. A menudo se les denomina ecosistemas adaptados al fuego o mantenidos por el fuego. En estas áreas, el fuego es un proceso absolutamente esencial. Si se quita el fuego, o si se altera el régimen de fuego más allá de su rango normal de variabilidad, el ecosistema se transforma en algo diferente, y se pierden hábitats y especies. Las especies individuales dentro de los ecosistemas dependientes del fuego han evolucionado en respuesta a características específicas del régimen del fuego, tales como frecuencia, intensidad y estación de quema, a la variabilidad de estas características, y en el espacio a medida que la vegetación se recupera. En términos de área, aproximadamente el 46% de las ecorregiones prioritarias del mundo está dominado por ecosistemas dependientes del fuego, es decir, que necesitan quemarse bajo el régimen de fuego adecuado para poder persistir en el paisaje [22] .

En contraste, algunos daños provocados por los incendios forestales son :

- Destrucción de madera, con impacto negativo a la economía de sus propietarios y del país.
- Erosión del suelo, que queda expuesto a los efectos directos del viento y de la lluvia.
- Falta de retención del agua, al no haber vegetación. Al no infiltrarse el agua

al subsuelo, se impide la formación de mantos subterráneos.

- Destrucción del hábitat de la fauna silvestre o exposición de ésta al ataque de otros depredadores.
- Generación y expedición de humos con contenidos de carbono y otros elementos nocivos al ambiente, producto de la combustión de la vegetación, lo que incrementa el efecto invernadero en la atmósfera terrestre.
- Disminución de oxígeno, al quemarse la vegetación que lo produce, con la consecuente afectación al clima del lugar.

La problemática que ocasionan los incendios forestales, así como su incidencia en el medio natural, ha llegado a establecer una fuerte sensibilización en las distintas administraciones públicas involucradas. Estas organizaciones dirigen importantes cantidades de sus presupuestos a la aplicación de planes de actuación que optimicen la prevención, la detección y extinción de incendios. Los planes de actuación permiten dotar a los espacios naturales de infraestructuras y recursos que permitan el control y descenso de las cifras de daños y perjuicios que proporcionan las series anuales de estadísticas de incendios.

La fragilidad de los ecosistemas ante situaciones de elevada frecuencia en la presencia del fuego incontrolado obliga a dedicar atención prioritaria por la importancia de las cualidades intrínsecas de éstos en el equilibrio medioambiental. Ello implica la necesidad de defenderlos de los incendios forestales, actuando sobre el medio con una óptima ingeniería de defensa que lo dote de infraestructuras operativas modernas y eficaces.

En un principio desde que se planteó la necesidad de combatir el desarrollo de los incendios forestales con el objeto de proteger la naturaleza y evitar los daños y perjuicios derivados en los ecosistemas forestales, se ha ido evolucionando con el transcurso del tiempo hacia un mejor conocimiento del problema, a fin de aplicar las estrategias preventivas más eficaces. Se puede decir que a medida en que se intensificó el problema, la conciencia social evolucionó, y la preocupación de los gestores

forestales y de las instituciones de investigación y universitarias por establecer los programas de protección y defensa en el territorio contra los incendios forestales fue mayor.

## 1.4 ESTRUCTURA DE LA TESIS

Esta tesis se encuentra estructurada de la siguiente manera.

- En el Capítulo 2, se introduce brevemente al lector con temas relacionados al trabajo de tesis, como incendios forestales, los sistemas de información geográfica, los problemas de localización de plantas de máxima cobertura, y problemas de optimización para incendios forestales encontrados en la literatura especializada.
- En el Capítulo 3, se describe el problema con mayor detalle. Se presenta el modelo matemático del problema de optimización que se pretende resolver así como una discusión de las suposiciones adoptadas por el mismo. Se presentan además las expresiones matemáticas para calcular los índices de peligro de incendios para la clasificación del área.
- En el Capítulo 4, se describe la metodología implementada para obtener soluciones al problema en cuestión. Esta metodología consta de tres fases: preprocesamiento, procesamiento y posprocesamiento. La primera fase consiste en calcular el índice de peligro potencial de incendios así como el índice de dificultad de extinción, ya que estos índices son los que permiten clasificar el área geográfica y de esta manera poder generar los puntos de demanda. La fase de procesamiento resuelve el modelo matemático por medio del método de ramificación y acotamiento. Finalmente la etapa de posprocesamiento muestra de manera visual la solución de asignación de recursos.
- En el Capítulo 5 se muestra la experimentación con la metodología propuesta. Se usan distintos escenarios de prueba variando las condiciones meteorológicas.

Ésto permite crear áreas geográficas con diferente prioridad de importancia. Con las diferentes áreas clasificadas en el preprocesamiento se hace una experimentación para el problema de cobertura. Para ilustrar la metodología propuesta se muestra un caso estudio para el estado de Chiapas, México.

- En el Capítulo 6 se presentan las conclusiones de este trabajo de tesis, las aportaciones, beneficios y discusión de trabajo futuro.
- Al final del trabajo se encuentran los apéndices donde se describen detalladamente las formulaciones de los índices de peligro de incendios forestales, así como un manual de la herramienta realizada. En el Apéndice A se introduce el concepto de modelos de combustible y se describen detalladamente los modelos que se usaron en el caso de estudio. En el Apéndice B se presentan las expresiones matemáticas que permiten determinar los índices de peligro de extinción. Finalmente en el Apéndice C se describe de manera breve un manual de usuario de la herramienta desarrollada.

## CAPÍTULO 2

# ANTECEDENTES

---

En este capítulo introducimos conceptos a los cuales se hace referencia en los siguientes capítulos en esta tesis. Presentamos conceptos básicos y fundamentales en el campo de incendios forestales y posteriormente se discute el trabajo relevante en el problema de localización de plantas de máxima cobertura, cuyo modelo es básico para el desarrollo de este trabajo de tesis. Se presenta además una revisión de la literatura de problemas de optimización para la gestión de incendios forestales.

En el manejo de incendios forestales, los encargados intentan iniciar una acción de supresión de fuego mientras los incendios son pequeños con la esperanza de que estando pequeños se puedan extinguir en poco tiempo [42]. La investigación de operaciones asociada a la aplicación de envío de fuerzas de supresión en zonas forestales, tiene mucho que ofrecer a los directivos de los incendios forestales en los temas relacionados con los problemas de toma de decisiones.

## 2.1 INTRODUCCIÓN A INCENDIOS FORESTALES

Un incendio forestal se entiende como un siniestro causado intencional, accidental o fortuitamente por el fuego que se presenta en áreas cubiertas de vegetación, árboles, pastizales, maleza, matorrales y, en general, cualesquiera de los diferentes tipos de asociaciones vegetales [29].

Todos los incendios forestales comienzan con una fuente de ignición. El rayo es una fuente de ignición común en los incendios forestales. Nueve de cada diez

incendios, sin embargo, comienzan directa o indirectamente por la gente, a través de productos como colillas de cigarrillos, las chispas de los equipos en funcionamiento, las líneas eléctricas, fogatas y otros medios.

### INCENDIOS FORESTALES EN MÉXICO

En México las principales causas que originan los incendios forestales se atribuyen principalmente a la actividad humana. Se estima que estas causas alcanzan 99 % del total nacional y sólo un 1 % tiene como causa fenómenos naturales derivados de eventos meteorológicos, como descargas eléctricas o erupción de volcanes [29].

Con base en la información estadística (en el periodo de 1998-2008 ver Figura 2.1) reportada por las áreas operativas, se tiene registrado que en promedio anual, las causas intencionales aportaron un porcentaje de 44 % respecto del total, siguiendo en orden de importancia con un 19 % las fogatas para proveer de luz y calor, las fogatas para la cocción de alimentos con 12 %, los fumadores con el 11 %, y el resto de causas que aportan, en conjunto, 14 % del total [29].



Figura 2.1: Porcentaje de causas de incendios forestales en el periodo 1998-2008

La ubicación de zonas forestales cerca de zonas habitadas por humanos y por el acceso de la población a los bosques y selvas es un factor de riesgo. Una zona

forestal a la que los humanos ingresan con facilidad y constancia es más propensa a padecer un incendio.

### 2.1.1 FACTORES AMBIENTALES

Dentro del la gran tríada del comportamiento del fuego formada por la topografía, meteorología y combustible, los factores topográficos son inmutables al menos en escalas cortas de tiempo.

#### FACTORES TOPOGRÁFICOS

La topografía de un paisaje afecta a la propagación de los incendios forestales. Todos los incendios forestales son diferentes en la forma en que se comportan debido a las combinaciones cambiantes de muchos factores, pero si el terreno se mantiene constante esto permite predicciones más constantes de cómo se comportará el fuego en un área específica [9].

Una definición de terreno podemos verla como la forma del paisaje, la altitud, la dirección de la pendiente y su exposición a la luz solar, y la inclinación de la pendiente. La forma de la tierra determina la cantidad el porcentaje de sombra que contiene un espacio, el cual afecta las condiciones de temperatura y viento. Algunos combustibles crecen mejor bajo condiciones diferentes. La cantidad de sombra o luz solar, la temperatura de una zona y la humedad recibida en un área determinan el tipo de combustible disponible para los incendios forestales.

La elevación y dirección de la pendiente afectan el tipo y la temperatura del combustible en la medida en la que hay áreas a la sombra y al sol. La elevación también afecta la cantidad de viento y la humedad de la zona. La inclinación de la pendiente es importante ya que contribuye a la rapidez con que el fuego llega al punto más alto o a la cima. Cuando un incendio se inicia en la parte inferior de una pendiente, los combustibles se encuentran arriba precalentados por el aire ascendente, lo cual les ayuda a incrementar fácilmente la captura de oxígeno cuando entran en contacto con las llamas.

Los incendios que comienzan cuesta arriba pueden depositar material combustible que rueda hacia abajo, permitiendo que más incendios comiencen cuesta abajo. Por lo tanto, con el fin de evitar la propagación de los incendios es importante minimizar el tiempo de atención a estos, maximizando la cobertura de los recursos disponibles. Por ejemplo, se puede tratar de ubicar la brigada o vehículo extintor adecuado en lugares estratégicos para que permita reducir los tiempos de atención a los siniestros.

El comportamiento del fuego en un incendio forestal depende de las características del terreno, del ambiente del sector que está siendo afectado y de las propiedades del material vegetal que está ardiendo, es decir de la topografía, el tiempo atmosférico y el combustible vegetal.

La topografía es el más constante de los tres componentes y tiene gran influencia en los otros dos.

Son tres los factores topográficos que afectan de forma importante el comportamiento del fuego: configuración, exposición y pendiente.

- La configuración o relieve condiciona el clima, especialmente la formación de microclimas, y tiene gran influencia en los regímenes de viento que van a incidir en la dirección y velocidad de propagación del fuego.
- La exposición o posición del terreno respecto al ángulo de incidencia de los rayos solares tienen un efecto importante sobre la temperatura y humedad relativa y el estado de la humedad de los vegetales combustibles.
- La pendiente es el factor topográfico de mayor importancia en el comportamiento del fuego. Ejerce una influencia en las formas de transmisión de energía, mientras más inclinadas sean las laderas, mayores serán las velocidades de propagación de un fuego que asciende por ellas.

## FACTORES METEOROLÓGICOS

Las variables meteorológicas que influyen en los incendios forestales pueden clasificarse en dos grupos:

(a) Las que afectan la posibilidad de inicio del fuego:

- Radiación solar.
- Precipitación.
- Temperatura del aire.
- Humedad relativa.

(b) Las que inciden en la velocidad de propagación:

- Velocidad del viento.
- Dirección del viento.
- Grado de estabilidad atmosférica.

El primer grupo de factores influye en la humedad de los combustibles y, aunque también afectan a la propagación del fuego, tienen una mayor influencia en su inicio. El segundo grupo afecta fundamentalmente a la combustión y a los procesos de transmisión de energía en el incendio, por lo que influyen decisivamente en el comportamiento del fuego.

## Índices meteorológicos de peligro

Existen multitud de factores que intervienen en la producción y en la propagación de un incendio forestal. Tres elementos forman el clásico triángulo del fuego: combustible, oxígeno y calor. Los tres elementos del fuego pueden representarse mediante el triángulo del fuego. Si el triángulo está incompleto no podrá producirse fuego. La base sobre la que se apoya la prevención del fuego y la lucha contra el

mismo consiste en romper el triángulo del fuego (ver Figura 2.2). A continuación se describen estos tres elementos.

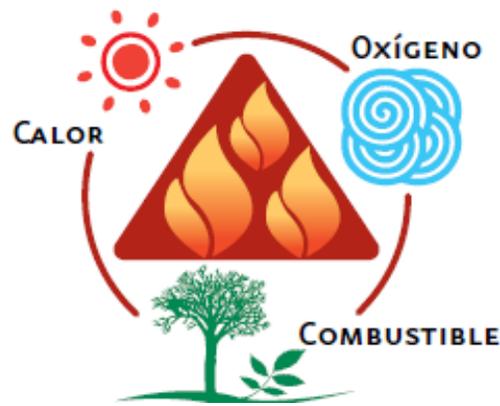


Figura 2.2: Triángulo del fuego.

*Oxígeno:* El aire que respiramos está compuesto de 21 % de oxígeno. El fuego requiere una atmósfera de por lo menos 16 % de oxígeno. El oxígeno es un carburante, es decir activa la combustión. El oxígeno del aire se encuentra siempre en la atmósfera, sin experimentar variaciones.

*Calor:* La energía necesaria para que el combustible vaporice y el fuego se inicie y mantenga se denomina calor. El calor es la energía requerida para elevar la temperatura del combustible hasta el punto en que se despiden suficientes vapores que permiten que ocurra la ignición. El calor es aportado por la causa (negligencia humana, incendiarios, rayos, etc.) y su efecto es instantáneo, por lo que no se puede predecir con seguridad su aparición.

*Combustible:* Este puede ser cualquier material capaz de liberar energía cuando se quema, ya sea sólido, líquido o gaseoso. La mayoría de los sólidos y líquidos se convierten en vapores o gases antes de entrar en combustión. El combustible formado por la vegetación forestal en este caso sufre variaciones continuas que influyen decisivamente tanto en la aparición como en la propagación del fuego [45].

## COMBUSTIBLES

El estado de la vegetación o más bien su inflamabilidad, depende de dos clases de factores, intrínsecos y extrínsecos. Los primeros son principalmente:

- *Composición de la materia vegetal*, que la hace combustible en sí.
- *Especie vegetal* , que modifica su inflamabilidad haciéndola más o menos alta.
- *Estado sevícola de la masa vegetal*, que determina la dimensiones y la cantidad de combustible existente.

Estos factores no varían continuamente, sino que permanecen estables durante periodos más o menos largos, por lo que su influencia a corto plazo es constante. De ellos se deduce que en una zona forestal existe un peligro permanente de incendio, que es preciso reducir, quitando combustible (cortafuegos, limpieas, etc.).

Los factores extrínsecos se pueden reducir en dos grupos fundamentales:

- *Relieve del terreno*, que influye sobre todo en la propagación del fuego y que es también de carácter permanente.
- *Factores meteorológicos*, que alteran la inflamabilidad de la materia vegetal al modificar su contenido de humedad y que facilitan la propagación del fuego por medio del viento.

De todos estos factores, los de carácter permanente no pueden ser objeto de un sistema de previsión del peligro de incendio, sino el punto de partida para establecerlo. Donde exista una masa forestal se sabe de antemano que puede producirse un fuego, debido a los factores permanentes. Los factores variables, en cambio, determinan si el peligro es mayor o menor. Por lo tanto los datos meteorológicos son los que nos permiten establecer un sistema de índice de peligro de incendios forestales.

Las consideraciones de los párrafos anteriores tienen por objetivo estimar el comportamiento del fuego más probable en un lugar y planificar las acciones preventivas de los incendios y organizar su extinción.

Por ello, desde hace mucho tiempo se ha intentado sintetizar esta información de manera que dicha estimación se pueda hacer de forma sistemática mediante modelos. Una descripción más detallada se encuentra en el Apéndice A.1.

Podemos concluir que el comportamiento del fuego describe la manera en que los combustibles se encienden y el fuego se propaga. Las influencias fundamentales en la propagación de los incendios forestales son el tipo de combustible, las características y las condiciones meteorológicas en la zona y el terreno [41].

## DESPACHO

Es en esta etapa donde se concentra, analiza y evalúa la información de las actividades de detección y combate de incendios forestales y donde se toman las decisiones para asignar y movilizar los recursos materiales y humanos necesarios para ello. Allí se organizan las operaciones con sumo cuidado, pues de su adecuado funcionamiento depende la oportunidad con que se establezca el combate inicial de un incendio.

El despacho de los recursos humanos y materiales al combate de un incendio es el factor de mayor importancia en el funcionamiento de El Centro Nacional de Control de Incendios Forestales de México (CENCIF). Su trabajo inicia en el momento mismo en que se detecta un incendio y éste es reportado por el sistema de detección (torre, avión o brigadas).

Con la información recibida del incendio el despachador asigna y envía personal debidamente equipado para iniciar el combate, manteniendo una constante comunicación por radio con el responsable del mismo, mientras llega al lugar donde se localizó el incendio.

Para el despliegue y control del incendio se requiere lo que es llamado ataque inicial.

El ataque inicial es la primera acción, cuyo objetivo es detener el avance del fuego en sus puntos más críticos. Una vez detenido el avance, se completa la línea

de control para circunscribir el fuego. La última fase es la extinción del incendio. El control de un siniestro depende de su magnitud. En algunas ocasiones se extingue con el ataque inicial. En tal caso, el ataque inicial prácticamente se confunde con el control e incluso con la liquidación del incendio.

La actuación frente a los incendios forestales no debe centrarse sólo en la extinción, sino que se debe dar un mayor énfasis a una buena política de prevención que evite que los incendios se produzcan o que permita que, una vez iniciados, la vegetación presente la mayor resistencia posible.

## 2.2 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

### 2.2.1 INTRODUCCIÓN

Un Sistema de Información Geográfica (SIG) es una integración organizada de hardware, software, datos geográficos y personal, diseñada para capturar, almacenar, manejar, analizar, modelar y representar en todas sus formas la información geográficamente referenciada con el fin de resolver problemas complejos de planificación y gestión. También puede definirse como un modelo de una parte de la realidad referido a un sistema de coordenadas terrestre y construido para satisfacer unas necesidades concretas de información [2].

El SIG funciona como una base de datos con información geográfica (datos alfanuméricos) que se encuentra asociada por un identificador común a los objetos gráficos de un mapa digital. De esta forma, señalando un objeto se conocen sus atributos e, inversamente, preguntando por un registro de la base de datos se puede saber su localización en la cartografía.

La razón fundamental para utilizar un SIG es la forma en que se guarda la información espacial. El sistema permite separar la información en diferentes capas temáticas y las almacena independientemente, permitiendo trabajar con ellas de manera rápida y sencilla. Esto facilita al profesional la posibilidad de relacionar la información existente a través de la topología de los objetos, con el fin de generar

otra nueva que no podríamos obtener de otra forma. Lo que más distingue un SIG de otros sistemas para dibujo, tratamiento de imágenes, diseño cartográfico, atlas digitales, etc., son las operaciones de análisis de datos.

### 2.2.2 INFORMACIÓN GEOGRÁFICA Y CARTOGRAFÍA DIGITAL

Se denomina Información Geográfica a aquellos datos espaciales georreferenciados requeridos como parte de las operaciones científicas, administrativas o legales. Dichos datos espaciales suelen llevar una información alfanumérica asociada. La georreferenciación es el posicionamiento en el que se define la localización de un objeto espacial en un sistema de coordenadas y datum determinado. Este proceso es utilizado frecuentemente en los Sistemas de Información Geográfica.

En la cartografía digital se mantiene la información temática (capas o coberturas) por separado, para combinarla en el momento adecuado con fines de análisis o con fines de presentación. Sin embargo, lo más importante es que los elementos del mapa son referenciados sobre la tierra.

Cualquier movimiento del puntero revela su posición actual con sus coordenadas geográficas (en grados y minutos) o en coordenadas geodésicas, en metros sobre el eje X y el eje Y. La escala del mapa digital no es fija, el mapa puede ser ampliado para ver más detalle o reducido, se puede incluso combinar mapas de distintas escalas, lo que no sería posible con cartografía tradicional.

### 2.2.3 FORMATOS VECTORIAL Y RÁSTER

Los datos espaciales en un SIG pueden ser representados a través de dos formatos o sistemas espaciales: vectorial y ráster. Son dos formatos muy diferentes, que se distinguen por su manera de almacenar los objetos geográficos (la base de datos geográfica)- Las dos formas de almacenar son: por atributos de estos objetos y por su apariencia.

En el formato vectorial, la información del mundo real es representada por

los puntos y líneas que definen sus límites o fronteras, estableciendo un sistema de coordenadas para localizar cada objeto. Un punto es representado por un par de coordenadas  $(X,Y)$ ; una polígono es un conjunto de coordenadas que corresponden a sus vértices  $(X_1Y_1; X_2Y_2; X_3Y_3; \dots)$  y un área.

En el formato ráster, el espacio está representado por un conjunto de celdas adyacentes llamadas píxeles, que representan las unidades de información espacial. Éstas establecen su localización por un sistema de referencia en filas y columnas, acompañado por la extensión del mapa y el tamaño de la celda. Los pixels en realidad no mantienen una relación mutua entre sí. En la cobertura de tipo ráster, cada celda tiene un valor o código asignado, correspondiente al tipo de información temática que representa la celda.

Esto es diferente en el formato vectorial, en el que cada objeto representa una unidad homogénea de información, con una topología que define sus relaciones con los demás objetos de la cobertura temática (en el caso de superficies compuestas por polígonos adyacentes o de líneas que forman una red). La asignación de atributos en el formato vectorial se realiza a través de una tabla de atributos asociada al área geográfico, en la cual un identificador conecta el objeto con su registro en dicha tabla.

## 2.3 PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN DE PLANTAS DE MÁXIMA COBERTURA

Los problemas discretos de localización de instalaciones consideran la siguiente situación. Se debe ubicar un cierto número de instalaciones, seleccionando la ubicación de las mismas a partir de un conjunto predeterminado de ubicaciones potenciales, para dar servicio a un conjunto de clientes. Las zonas potenciales para la ubicación de las instalaciones deben escogerse de una manera óptima con respecto a uno o varios criterios. Los problemas de localización de instalaciones se aplican a una gama muy amplia de situaciones y por ello son ampliamente estudiados en el

ámbito de la investigación de operaciones [16] [4].

Generalmente, los problemas discretos de localización de instalaciones están relacionados con procesos de toma de decisiones estratégicas, ya que consideran situaciones que implican niveles importantes de inversión y por lo tanto, cualquier cambio implicaría niveles de costo considerables para una organización. Por ejemplo, reubicar una planta de ensamble automotriz (atendiendo a variaciones en la demanda, costos de transporte, etc.) implicaría costos muy elevados, no solo para la empresa automotriz, sino también para sus proveedores, que usualmente ubican sus instalaciones en lugares cercanos a las plantas de ensamble. Lo mismo sucede en el caso de centros de servicio (hospitales, escuelas, etc.) cuyo emplazamiento supone altos niveles de inversión.

En la literatura se estudian una gran variedad de problemas de localización de plantas. Entre los problemas clásicos están el problema de la  $p$ -mediana [31] el problema de  $p$ -centro [30], y el problema de cobertura [16]. Estos problemas se aplican a situaciones en las que el servicio depende de la distancia entre el cliente y la instalación a la que está asignado. El caso más simple es el problema de cobertura de conjuntos, que busca cubrir a todos los clientes ubicando el mínimo de instalaciones.

Uno de los problemas clave asociado a este modelo es cuando se excede el número de puntos de demanda y es imposible cubrir a todos estos, por motivos de presupuesto limitado. En estos casos se trata de satisfacer a el mayor número de puntos de demanda con las instalaciones que se tienen. Asimismo, en el problema de cobertura de conjuntos, se le da la misma relevancia a todos los clientes, es decir, es igualmente importante proporcionar cobertura a un cliente que genere una petición de servicio por año, que proporcionar cobertura a un cliente que genere mil peticiones de servicio por año. De las dos consideraciones anteriores surge el problema de máxima cobertura.

El problema de localización de máxima cobertura (MCLP, por sus siglas en inglés, *Maximum Coverage Location Problem* ) restringe el número de plantas a localizar a un número finito de ubicaciones, maximizando la cantidad de demanda

cubierta. En este tipo de modelos el grupo de plantas candidatas es el mismo que el grupo de los puntos de demanda, por lo tanto, el MCLP permite que las plantas puedan ser localizadas en cualquiera de estos puntos.

El MCLP tiene aplicaciones tanto en el sector privado como en el público: localización de antenas de telecomunicación, escuelas, bibliotecas, paradas de autobuses, servicios médicos de emergencia, servicio de ambulancias, estaciones de bomberos y policía, centros de salud rurales, localización de sucursales de bancos, centros comerciales, parques, etc. Las primeras investigaciones sobre el modelo de localización de máxima cobertura fueron realizadas en 1974 por Church y ReVelle [6]. Ellos buscan maximizar la demanda cubierta utilizando el MCLP, en el que la flota de ambulancias es homogénea y el número de vehículos es fijo.

En el contexto de esta tesis el modelo que adecuamos para nuestro problema proviene del trabajo de Dimopoulou y Giannikos [11]. En éste los recursos disponibles de lucha contra incendios es dado y el principal objetivo es determinar su despliegue óptimo. Este modelo tiene rasgos del MCLP, donde se emplea para determinar la localización óptima para estos recursos, de manera que la sub-regiones definidas por el método de clasificación están cubiertos adecuadamente. Sin embargo, el modelo difiere del clásico MCLP, ya que en el utilizado se considera un plazo diferente para cada clase. En general, el plazo representa el tiempo durante el cual el fuego se puede extinguir o su supresión puede ser efectiva y depende de las condiciones reinantes en cualquier sub-región en particular.

## 2.4 MODELOS DE OPTIMIZACIÓN EN LA GESTIÓN DE RECURSOS FORESTALES

La Programación Lineal Entera Mixta y Programación Lineal han sido utilizadas para la planificación forestal desde los años 60 para apoyar la toma de decisiones sobre la gestión forestal. En particular, durante las dos últimas décadas se ha producido un aumento en el interés del manejo forestal. Además, las nuevas preocupaciones

ambientales, como la sustentabilidad de los recursos forestales y la vida silvestre, imponen que se preste más atención a las actividades llevadas en el suelo forestal.

### 2.4.1 INVESTIGACIÓN DE OPERACIONES EN GESTIÓN FORESTAL

Barrett y Gilles [3] presentan un problema de tala de árboles con restricciones de adyacencia. Se desea planificar la tala teniendo como prioridad la vista del paisaje. Se tiene como función objetivo maximizar la ganancia neta, teniendo como limitación talar en unidades contiguas. Las restricciones de adyacencia crecen exponencialmente, para la solución del problema se programó una heurística para evitar las restricciones de adyacencia mediante subgrafos.

Church, Murray y Barber [7] presentan varios modelos de planificación a nivel táctico que se han desarrollado como parte de un esfuerzo de investigación apoyado por el Servicio Forestal de los Estados Unidos. Estos modelos se han utilizado en la gestión del uso del suelo y la planificación del bosque a través de un sistema desarrollado para la toma de decisiones.

El desarrollo de modelos para apoyar la gestión de los recursos naturales es un área importante y activa de la investigación. En la ordenación forestal y la planificación, tales modelos ya han demostrado ser muy valiosos para comprender mejor la dinámica regional. En este trabajo se discute la necesidad de modelos de nivel táctico en la estructura de planificación jerárquica de la selva. Esta estructura jerárquica refleja el entorno de la toma de decisiones del Servicio Forestal y es bastante intuitivo y razonable.

King [32] muestra dos técnicas de simulación secuencial y recocido simulado, las cuales se comparan para localizar focos de árboles de alto valor comercial en Pennsylvania. Para tener la información de los recursos forestales se suele hacer inventarios de suelo por medio del muestreo, la fotografía aérea, o teledetección. El punto de muestreo es costoso y consume tiempo. Menos costoso es la fotografía aérea y la teledetección, pero estas técnicas no pueden proporcionar los detalles necesarios.

Es por ello que surge la necesidad de crear técnicas que estimen lugares no muestreados para crear un mapa continuo de los recursos forestales por medio de métodos geoestadísticos.

El trabajo de Lohmander [37] presenta un resumen de conceptos, ideas y resultados en el ámbito de la optimización secuencial y fenómenos estocásticos en el sector forestal. El trabajo presentado abarca las decisiones forestales y económicas que se basan en la toma de decisiones secuenciales.

En el trabajo presentado por Weintraub, et al [47] se discuten los problemas combinatorios, principalmente de los bosques y los algoritmos de solución que se han propuesto para estos problemas, incluyendo heurísticas de búsqueda local y búsqueda aleatoria. En este trabajo se discute cuál de los enfoques propuestos se ha utilizado con éxito, las ventajas y deficiencias de cada uno y cuáles son los problemas de investigación que siguen abiertos.

Se han desarrollado modelos para apoyar a la toma de decisiones en la cosecha. En el trabajo de Liu [35] se desarrolla un modelo determinista que se resuelve por medio de una heurística para la planificación de cosecha sostenible, el algoritmo propuesto es implementado, y su desempeño se compara con la de un método exacto.

Epstein et al [15] presentan un problema importante y difícil de resolver en la gestión forestal, que consiste en satisfacer la demanda de la cosecha, mientras que maximiza los beneficios netos. Desarrolla uno de los pocos métodos reportados para la solución de corto plazo para el problema de la cosecha utilizando un enfoque de programación lineal. Los resultados obtenidos muestran mejoras obtenidas de 8 % en los ingresos netos sobre los enfoques manuales tradicionales.

Hjorsto [26] presenta un caso de estudio en una versión modificada de la opción estratégica de desarrollo y análisis para incrementar el nivel de participación de los

ciudadanos en un proceso de planificación forestal.

Hernández y Buenrostro [24] han trabajado en simulaciones sobre el cambio de uso de suelo con cadenas de Markov, con el fin de conocer el comportamiento que ayude a determinar cobertura de un bosque después de 50 años. Se concluye que los bosques naturales sufrirán un cambio de uso que será destinado principalmente a los cultivos y en una ínfima probabilidad a que vuelva a ser un bosque. Se toma como base de datos los patrones y tasas de uso de suelo en México para el caso de bosques, del Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales de la SEMARNAT y del INEGI.

En la Tabla 2.4.1 se muestra un resumen de esta revisión bibliográfica acerca de problemas relacionados con la investigación de operaciones en los recursos forestales. En la primera columna encontramos los autores y año, en la segunda columna una breve descripción del problema, y en las dos últimas columnas el tipo de modelo usado para la resolución del problema, que puede ser D (Determinista), E (Estocástico), la metodología H(Heurístico) o E (Exacto).

## 2.4.2 INVESTIGACIÓN DE OPERACIONES EN INCENDIOS FORESTALES

Las prácticas de gestión de incendios varían en torno en las diferentes partes del mundo debido a las variaciones en el clima, la vegetación y las necesidades de la sociedad. En diferentes países se ha abordado el problema de gestión de incendios como son Australia (Loane y Gould [36]), Rusia (Kurbatskii y Tsvetkov [34]) y Grecia (Dimopoulou y Giannikos [11]).

Los desastres naturales son inevitables y no es posible recuperar plenamente las zonas forestales afectadas por causa de los desastres. Pero, en cierta medida, es posible minimizar el riesgo potencial mediante el desarrollo de estrategias de alerta temprana para desastres, elaborar y ejecutar planes de desarrollo para ofrecer resis-

Tabla 2.1: Revisión bibliográfica acerca de problemas relacionados con la investigación de operaciones en problemas de gestión de recursos forestales

| Autores                             | Tipo de problema  | Modelo | Metodología |
|-------------------------------------|---|--------|-------------|
| Barret y Gilles (2000) [3].         | Se planifica la tala teniendo como prioridad la vista del paisaje.  | D      | H           |
| Church, et al (2000) [7].           | Se presentan distintos modelos de planificación forestal.   | D      | E           |
| Susan L. King (2000) [32].          | Se comparan dos técnicas para localizar focos de árboles de alto valor comercial en Pennsylvania.                                   | D      | H           |
| Peter Lohmander (2000) [37]         | Se resumen de los conceptos y resultados en el ámbito de la optimización secuencial y fenómenos estocásticos en el sector forestal. | E      | H           |
| Chiun Ming Liu (2001) [35].         | Se desarrolla un modelo determinista que se resuelve por medio de una heurística para la planificación de cosecha sostenible        | D      | H           |
| Epstein, et al. (1999) [15].        | Se discuten los problemas combinatorios, principalmente de los bosques y los algoritmos de solución.                                | D      | E           |
| Hernández y Buenrostro (1999) [15]. | Se hacen simulaciones sobre el cambio de uso de suelo con cadenas de Markov   | E      | H           |

tencia a tales desastres y ayudar en la rehabilitación y la reducción de los incendios. Los incendios forestales no controlados han afectado negativamente el paisaje y la economía local.

La investigación de operaciones ha trabajado en las estrategias de la gestión de incendios en diversas áreas elaborando diferentes estrategias en las siguientes áreas:

- Predicción de ocurrencia de incendios [33]
- Prevención de incendios [23]
- Detección de incendios [33]
- Ataque inicial de despliegue de recursos [20]
- Envío de ataque inicial [20]
- Planificación estratégica [10]

En el trabajo de Dimopoulou y Giannikos [11] la metodología que se emplea para clasificar las regiones dentro de un área forestal es de acuerdo a varios factores que afectan el desarrollo de un incendio forestal como son: clima, vegetación, pendiente y velocidad del viento. De acuerdo a estos factores, la clasificación se basa en información proporcionada por un SIG. Esta información se transmite luego a un modelo de optimización que determina la ubicación óptima de los recursos de extinción de incendios. Un modelo de máxima cobertura es empleado para que tenga en cuenta la clasificación de las regiones mediante la variación de la cobertura en las regiones de clase diferente. El método se ha aplicado a la zona de Parnitha, cerca de Atenas. En este modelo el número de vehículos disponibles de lucha contra incendios es dado y el principal objetivo es determinar su despliegue óptimo. En consecuencia, el modelo del MCLP fue empleado para determinar la localización óptima para estos vehículos, de manera que la sub-regiones definidas por el método de clasificación estén cubiertas adecuadamente. El modelo difiere del clásico problema MCLP, ya

que en el propuesto por Dimopoulou se considera un plazo diferente para cada clase. En general, el plazo representa el tiempo durante el cual el fuego se puede extinguir o su supresión puede ser efectiva y depende de las condiciones reinantes en cualquier sub-región en particular. En esta tesis se hace uso del modelo de Dimopoulou y Giannikos [11] para desarrollar la herramienta de gestión de incendios propuesta.

Haight y Fried [21] presentan un modelo de programación entera mixta estocástica que permite optimizar tanto el despliegue de recursos como el número de incendios que no reciben respuesta en un tiempo estándar, el número y ubicación de recursos representan una incertidumbre, para suprimir el fuego. El modelo incluye las ubicaciones de estaciones de fuego y las posibles ubicaciones de los incendios junto con los tiempos de los viajes entre las estaciones y los incendios. Los recursos de despliegue y el envío de las decisiones están incluidos en una formulación en dos etapas. El despliegue de los recursos se da al comienzo del día, donde el número, ubicación, y la intensidad del fuego son conocidos, y la supresión tiene lugar durante el día la cual depende de la situación del incendio. El objetivo es minimizar el número esperado de incendios que no reciben una respuesta estándar así como el número de recursos necesarios que pueden llegar al fuego dentro de un tiempo límite de respuesta, sujetas a la disponibilidad de recursos. El modelo fue aplicado a un área de estudio de 3,642 km<sup>2</sup> en el centro de California. Se utiliza el California Fire Economics Simulator (CFES2), versión 2, para una simulación estocástica acerca del número de incendios diarios en esa región. Los autores [21] usaron un modelo para colocar hasta 22 motores de entre 15 estaciones en la unidad de Amador-El Dorado del Departamento de Silvicultura y Protección contra Incendios en California central. Se utilizó un modelo de simulación estocástica de ataque inicial. Muestran soluciones con una curva de equilibrio, donde un número creciente de motores desplegado reduce el número esperado diario de incendios que no recibieron respuesta.

Los modelos de ubicación de recursos para incendios forestales suelen ser contruidos para un solo incendio y determinar el número y tipo de medios de extinción de su expedición para minimizar el costo de supresión y el daño a los recursos na-

turales, con restricciones de disponibilidad. En el modelo de Donovan y Rideout [12] se plantean una función objetivo, la cual es minimizar el área quemada e incluye variables binarias de contención de un solo incendio basado en el perímetro con intervalos de tiempo discreto (por ejemplo, horas) después de la ignición. Con el modelo propuesto se desea distribuir los recursos y contener el incendio a la mayor brevedad posible. Además, el modelo requiere como datos de entrada la velocidad de avance del fuego, la zona del incendio y el crecimiento del perímetro.

Gorte y Gorte [19] hacen una determinación de la mezcla específica de recursos de lucha contra incendios para un incendio determinado, para identificar el mínimo valor de la función de costo. Resuelven el modelo mediante el lenguaje de programación LINGO. Realizan además un análisis de sensibilidad que se hace sobre los datos del modelo, para demostrar la flexibilidad de la estructura del modelo. Además, el modelo se utiliza para determinar los recursos a usar teniendo limitaciones de presupuesto a las que suelen enfrentarse los gestores de fuego. Este modelo, al igual que otros modelos de planificación de instalación de recursos para extinguir el fuego, requiere el uso de datos históricos de incendios en el área de estudio.

En la tabla 2.3 se da un resumen de la revisión bibliográfica acerca de los problemas relacionados con la investigación de operaciones en los incendios forestales.

Por otro lado se han creado herramientas computacionales cuyo objetivo fundamental es obtener la mejor forma de utilizar los recursos disponibles de forma que el valor de la superficie afectada sea mínimo. La primera dificultad al buscar la mejor actuación de los recursos utilizados para la extinción en incendios forestales es su naturaleza multiobjetivo: el mejor combate debe minimizar, conjuntamente, las repercusiones del incendio sobre distintos factores económicos, ambientales y sociales. La existencia de múltiples objetivos dificulta la obtención de soluciones en tiempo real para cual se han creado modelos de la integración de la información [40].

Tabla 2.3: Revisión bibliográfica acerca de problemas relacionados con la investigación de operaciones en problemas de gestión de incendios forestales

| Autores                            | Tipo de problema  | Modelo | Metodología |
|------------------------------------|---|--------|-------------|
| Dimopoulou y Giannikos [11] (2000) | Desarrollan un modelo de optimización que determina la ubicación óptima de los recursos de extinción de incendios.  | D      | E           |
| Haight y Fried [21](2007)          | Presentan un modelo de programación entera mixta estocástica que permite optimizar tanto el despliegue de recursos como el número de incendios que no reciben respuesta en un tiempo estándar, el número y ubicación de recursos representan una incertidumbre, para suprimir el fuego. | E      | E           |
| Donovan y Rideout [12] (2003)      | Proponen un modelo para minimizar el área quemada e incluye variables binarias de contención de un solo incendio basado en el perímetro con intervalos de tiempo discreto.  | D      | E           |
| Gorte y Gorte [19] (1979)          | Proponene un modelo para minimizar costo en la determinación de la mezcla específica de recursos de lucha contra incendios.   | D      | E           |

## CAPÍTULO 3

# PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

---

En este capítulo se presenta detalladamente el problema abordado en esta tesis. Primeramente se describe el problema así como los datos y supuestos. Posteriormente, se presentan las expresiones matemáticas para calcular el índice de peligro potencial de incendios, y finalmente la modelación al problema de máxima cobertura de la zona forestal.

### 3.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA Y SUPUESTOS

El objetivo principal es encontrar la ubicación óptima de los recursos para extinguir incendios forestales. Se conocen los puntos de demanda y las posibles ubicaciones. El conjunto de puntos de demanda es a su vez el de los sitios potenciales de ubicación. Cada punto de demanda tiene un peso asignado esto depende de la importancia de la zona. Se espera obtener la ubicación de los recursos de tal manera que maximice la suma ponderada de puntos de demanda dada la importancia de la zona, bajo las siguientes requerimientos:

- Un punto de demanda puede ser cubierto por más de un recurso.
- Existe un número limitado de recursos.

La principal razón es extinguir lo más pronto posible los incendios forestales y así minimizar el riesgo potencial mediante el desarrollo de estrategias de alerta temprana para desastres, elaborar y ejecutar planes de desarrollo para ofrecer resistencia

a tales desastres y ayudar en la reducción de los incendios ya que incendios forestales no controlados han afectado negativamente el paisaje y la economía locales.

Se requiere clasificar el área de estudio según su riesgo para generar los puntos de demanda. Para poder clasificar la zonas de mayor riesgo o mayor importancia, necesitamos saber el índice de peligro potencial que permite determinar el peligro en función de la *vegetación* existente y en función del *relieve* y de la influencia que la *meteorología* ejerce sobre ella. La descripción a detalle del cálculo de este índice se encuentra en las siguientes secciones de este documento.

## 3.2 MODELO MATEMÁTICO

Previo a la formulación del problema se definirá la notación empleada en el modelo así como los parámetros y variables de decisión que intervienen en el mismo.

### NOTACIÓN

#### *Conjuntos e índices*

$I$  Conjunto de zonas candidatas para la instalación de recursos

$J$  Conjunto de puntos de demanda

$K$  Conjunto de recursos

#### *Parámetros*

$N(j, k)$  Conjunto de zonas candidatas que pueden cubrir la demanda del punto  $j$  por recursos del tipo  $k$ ;  $j \in J, k \in K$

$w_j$  Peso según la necesidad de protección;  $j \in J$

$S_k$  Número de recursos de tipo  $k$ ;  $k \in K$

$N(j, k)$  es el conjunto de lugares candidatos que pueden cubrir al punto de demanda  $j$  por recursos del tipo  $k$ . Más específicamente, donde  $T_{\text{Max}}(j)$  es el tiempo

límite calculado en función del tipo de demanda del punto  $j$  para el ataque inicial del incendio. Si denotamos por  $t(i, j, k)$  el tiempo requerido para que un recurso del tipo  $k$  pueda viajar de la ubicación  $i$  al punto de demanda  $j$ .

$$N(j, k) = \{i | t(i, j, k) \leq T_{\text{Max}}(j)\}$$

*Variables de decisión*

$$x_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{si el recurso del tipo } k \text{ es colocado en } i ; i \in I, k \in K \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

$$y_j = \begin{cases} 1 & \text{si la demanda del punto } j \text{ es cubierta por al menos un recurso;} \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

MODELO

$$\text{maximizar} \quad f = \sum_{j \in J} w_j y_j \quad (3.1)$$

$$\text{Sujeto a:} \quad y_j - \sum_{i \in N(j, k)} \sum_{k \in K} x_{ik} \leq 0 \quad j \in J \quad (3.2)$$

$$\sum_{i=1}^I x_{ik} = S_k \quad k \in K \quad (3.3)$$

$$x_{ik}, y_j \in \{0, 1\} \quad i \in I, j \in J, k \in K \quad (3.4)$$

La función objetivo (3.1), representa la maximización ponderada del número de puntos de demanda que son cubiertos. Los diferentes valores de  $w_j$ , expresa las diferentes necesidades de protección. Dado que algunos de los puntos de demanda no pueden ser cubiertos debido a la limitación del número de recursos, los puntos de demanda que requieran mayor protección son los que serán cubiertos. Las restricciones (3.2) especifican que un punto de demanda  $j$  es cubierto únicamente si al menos un recurso es colocado en un punto que pueda cubrir a  $j$ , dentro del tiempo límite.

Las restricciones (3.3) representan que la suma de los tipos de recursos sean iguales a los disponibles, para así garantizar ubicar todos los recursos. Las restricciones (3.4) indican la naturaleza binaria de las variables de decisión.

El modelo desarrollado es un modelo mono-objetivo, donde la función que mide el número de puntos de demanda cubiertos, se representa por la suma ponderada de los puntos de demanda que fueron cubiertos. Se han resuelto instancias hasta de más de 11,000 puntos de demanda, es decir, 22,000 variables binarias. El tiempo de solución es de 3 segundos, con esto garantizamos que para instancias menores a 11,000 puntos de demanda es manejable el problema.

### 3.2.1 DEFINICIÓN DE PUNTOS

Ahora bien, para definir los conjuntos  $I$  y  $J$  es necesario saber la clasificación del área de estudio. El índice de peligro potencial presentado en la sección 3.2.1 nos permite definir la importancia de la zona. Existen 3 clases peligro bajo, medio y alto. Cada clase tiene establecido al distancia máxima que debe de existir entre dos puntos de demanda. Naturalmente para la clase 1 (peligro alto) la distancia entre los puntos de demanda es menor comparada con la clase 2 y 3. También cada clase tiene un tiempo límite de llegada de los recursos.

La Tabla 3.1 muestra los tiempos limites en que el vehículo de brigadas debe de llegar a extinguir el fuego dependiendo de cada clase.

Tabla 3.1: Tiempo límite de las clases

| Clase | Tiempo límite (min) |
|-------|---------------------|
| 1     | 25                  |
| 2     | 50                  |
| 3     | 80                  |

Aparte del tiempo limite, la distancia depende de la calidad del camino y de la velocidad promedio del vehículo. Consecuentemente para el área 1 que es la más importante y la del menor tiempo, la distancia entre sus puntos de demanda es más

pequeña que en la clase 2 y 3. La Tabla 3.2 muestra la distancia entre los puntos de demanda de cada clase [46].

Tabla 3.2: Distancia máxima de los puntos de demanda

| Clase | Color   | Distancia (km) |
|-------|---|----------------|
| 1     |  | 15             |
| 2     |  | 30             |
| 3     |  | 45             |

En la Figura 3.1 se pueden apreciar los puntos de demanda generados según la importancia de la zona. El detalle de cómo generarlos se explica en el Capítulo 4.1.3.

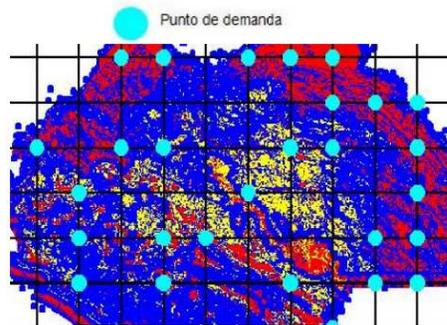


Figura 3.1: Puntos de demanda

La importancia de la zona se clasifica por índices, los cuales dependen de las características del área de estudio, como se mencionó en el capítulo 2. Para hacer la clasificación del área se requiere de ciertos cálculos. Los índices de peligro son en función de la vegetación existente y en función del relieve y de la influencia que la meteorología ejerce sobre ella. La descripción a detalle de la formulación para la clasificación de la importancia de la zona se muestra en la siguiente sección.

### 3.2.2 ÍNDICE DE PELIGRO POTENCIAL DE INCENDIOS FORESTALES

Los índices presentados en las secciones 3.2.1-3.2.3 están basados en la formulación de Francisco Rodríguez y Silva. [46].

Este índice, denominado índice de peligro potencial, requiere para su empleo un conjunto de entradas, entre las que se encuentran las relativas a la identificación espacial del territorio (modelo digital del terreno), las correspondientes a la identificación de los modelos de combustibles, las cuales deberán ser cartografiadas y digitalizadas y por último, información sobre la variabilidad de los parámetros meteorológicos para todo tiempo ( $t$ ) en el que interese conocer el grado de evolución del peligro.

El índice de peligro potencial es el resultado de la suma de tres componentes. La información aportada por ellos representa las tres fases que caracterizan la organización y consolidación de la combustión en presencia del incendio forestal.

Mediante el índice de ignición (Iig) se determina la facilidad que presentan las acumulaciones de restos vegetales finos muertos para entrar en combustión tras la aplicación de una fuente de calor, que viene a indicar la mayor o menor predisposición que presentan los combustibles para aceptar energía calórica y comenzar las reacciones de oxidación que determinan la combustión.

Mediante el índice de comportamiento dinámico (Icd) se evalúa la mayor o menor facilidad que tienen los combustibles afectados por la ignición para dar continuidad a las reacciones de oxidación en función de su propia combustibilidad, de la influencia que reciben de la pendiente del terreno y de la velocidad del viento: Es pues un indicativo de la materialización de la evolución espacial que presenta el frente activo en los estadios iniciales de la propagación. En este índice, se aportan al modelo las propiedades intrínsecas que presentan los combustibles en relación a la estructura y organización espacial de cara a las facultades que poseen para poder extender, vía transmisión energética, la combustión. Con el diseño de este índice se ha perseguido la inclusión en el modelo de un sumando que incorpore el efecto dinámico posterior a la ignición.

El último componente del modelo, denominado subíndice energético (Ice), incorpora la valoración de la fase consolidada de la combustión. Viene a representar

la expresión completa del proceso una vez que desde la ignición se ha concatenado las reacciones de oxidación, de tal forma que mediante igniciones de elementos diferenciales de combustibles se produce a su vez la continuidad del movimiento desde dichos elementos diferenciales que han entrado en combustión hacia los contiguos que entran en fase de precalentamiento. En este índice se incluyen las salidas, que identifican las características propias de la propagación. Es decir, la velocidad de propagación, la longitud de la llama la intensidad lineal del frente de avance y el calor por unidad de área.

Para la aplicación de las expresiones que proporcionan los valores cuantificados de cada uno de los componentes se consideran los siguientes criterios en la elección de los valores meteorológicos. En la velocidad del viento se toma la más frecuente para ello se requiere una base de datos en un gran periodo de tiempo y en lo que respecta en los valores termo-higrométricos se consideran las horas de mayor radiación solar.

Las expresiones que componen el índice de peligro potencial se indican a continuación.

$$I_{pp} = I_{ig} + I_{cd} + I_{ce} \quad (3.5)$$

$$I_{ig} = (PI_{mi})(CI_{mi})(Si/Stc) \quad (3.6)$$

$$I_{cd} = (CD_{mi})(Si/Stc) \quad (3.7)$$

$$I_{ce} = V_p + Al + I \quad (3.8)$$

La ecuación (3.6) representa el índice de ignición ( $I_{ig}$ ).

La ecuación (3.7) representa el índice de comportamiento dinámico de la propagación tras la ignición a la velocidad de viento más frecuente ( $I_{cd}$ ).

La ecuación (3.8) representa el índice de comportamiento energético (Ice). Se obtiene por la suma de los pesos asignados a cada uno de los intervalos en que se han dividido los valores que pueden registrar tras la resolución de las ecuaciones de comportamiento del fuego.  $V_p$  representa la velocidad de propagación del frente de llama (m/min).  $Al$  es la longitud de llama (m).  $I$  es la intensidad lineal del frente de avance (Kcal/m/s).

( $PI_{mi}$ ) La probabilidad de ignición del modelo de combustible ( $mi$ ), a la hora del día de mayor intensidad en la radiación solar.

( $Si$ ) Superficie que ocupa el modelo ( $mi$ ) en el área de análisis.

( $Stc$ ) Superficie total del área de análisis.

( $CI_{mi}$ ) Coeficiente de ignición característico de cada modelo.

( $CD_{mi}$ ) Peso asignado según tabla para la velocidad de propagación, con velocidad de viento más frecuente y pendiente máxima.

( $R_p$ ) La ecuación (3.5) representa el índice de peligro potencial de incendios en áreas forestales.

El cálculo de las expresiones anteriores así como los pesos de asignación se encuentra detallados en el Apéndice B.1.

### 3.2.3 ÍNDICE DE DIFICULTAD PARA LA EXTINCIÓN

Para poder planificar las acciones preventivas en cada zona de análisis territorial, es necesario complementar los índices anteriormente expuestos mediante un índice evaluador de la dificultad que en cada una de ellas se presenta para la realización de las actividades de extinción. Este índice se construye mediante el empleo de forma integrada de alguno de los índices anteriormente indicados y con la incorporación de la información relativa a las tasas de rendimientos en apertura de líneas de defensa, mediante equipos de especialistas de extinción, corregidas según los porcentajes de pendientes promedio existentes de los diferentes modelos de combustible presentes en las zona de análisis. Este índice se ve representado por la ecuación (3.9)

$$I_{dex} = I_{ce} / (I_{mi} + I_{ald}) \quad (3.9)$$

(*I<sub>dex</sub>*) La ecuación (3.9) representa el índice de dificultad de extinción.

(*I<sub>ce</sub>*) Representa el índice de comportamiento energético de acuerdo a la formulación indicada para obtener el peligro potencial.

(*I<sub>mi</sub>*) Representa índice de movilidad.

(*lald*) Representa el índice de apertura de líneas de defensa: este se determina de acuerdo a la siguiente expresión:

$$lald = Trh * Cp \quad (3.10)$$

(*Trh*) Representa el peso asignado a la tasa de rendimiento en la apertura de líneas de defensa según los modelos de combustible, mediante equipos de especialistas de extinción. (Detallado en el Apéndice B.2)

(*Cp*) Representa el coeficiente de ajuste según el tipo de pendiente existente en cada uno de las áreas que ocupan los modelos de combustible. (Detallado en el Apéndice B.2).

El cálculo de las expresiones anteriores así como los pesos asignados a cada uno de los parámetros se encuentran detallados en el Apéndice B.2.

### 3.2.4 ÍNDICE DE PRIORIDAD DE DEFENSA

Para la clasificación de la zonas de peligro se tomará en cuenta el índice de prioridad de defensa, el cual se calcula por la suma ponderada del índice de peligro

potencial de incendios (3.5) y el índice de dificultad de extinción (3.9) representado por la ecuación (3.11).

$$Ipd = (0.45) * Ipp + (0.55) * Idex \quad (3.11)$$

Para identificar si el índice de prioridad de defensa es bajo, medio o alto se usa la siguiente Tabla 3.3.

Tabla 3.3: Clasificación del índice de prioridad de defensa

| IpD       | Peligro |
|-----------|---------|
| 0-0.7     | Bajo    |
| 0.8 - 1.5 | Medio   |
| 1.6 o más | Alto    |

El mapa de clasificación se realizará dependiendo del  $Ipd$ , que servirá de entrada al modelo de optimización. El cálculo de estos índices son necesarios para la clasificación del área. El área clasificada es procesada en un mapa, el cual es entrada para definir los conjuntos  $I$  y  $J$ . Dependiendo del área se generaran los puntos de demanda. Donde el área de peligro alto tendrá un mayor número de puntos de demanda, para el caso de peligro bajo el número de puntos de demanda será menor.

## CAPÍTULO 4

# METODOLOGÍA DE SOLUCIÓN

---

En este capítulo se describe la metodología que se propone para resolver el problema de ubicación de recursos extintores en el manejo de incendios planteado previamente. Básicamente se plantean tres partes fundamentales: preprocesamiento, procesamiento y postprocesamiento.

El procesamiento de mapas de combustibles y pendientes es realizado en un SIG, basado en datos reales.

La creación del visualizador llamado IPDMM(índice de prioridad de defensa y modelación matemática) se hace en el lenguaje de programación Lazarus, donde se calcula el índice de peligro potencial de incendios, índice de dificultad de extinción, índice de prioridad de defensa y se procesan para el cálculo de los parámetros necesarios en el modelo del problema. Además se genera el modelo matemático a ser resuelto en la siguiente etapa.

El procedimiento de solución para el problema de programación entera que se plantea en esta tesis está basado en método de ramificación y acotamiento lo cual nos garantiza que la solución encontrada es la óptima, y que si el problema es fácil se puede encontrar la solución en un tiempo razonable.

Este capítulo se divide en tres secciones principales las cuales se describen cada una de las tres etapas: preprocesamiento de datos, procesamiento y posprocesamiento. En la sección de preprocesamiento de datos se mencionan los pasos que se siguieron para clasificar las zonas forestales según el tipo de vegetación y la importancia según la protección. En esta etapa se realiza la instancia del problema. En la sección

de procesamiento se resuelve el modelo de programación matemática por el método de ramificación y acotamiento. Por último en la sección de postprocesamiento, se describe la solución gráficamente en la imagen del área de estudio.

Los principales pasos de la metodología propuesta pueden apreciarse en el diagrama de la Figura 4.1.

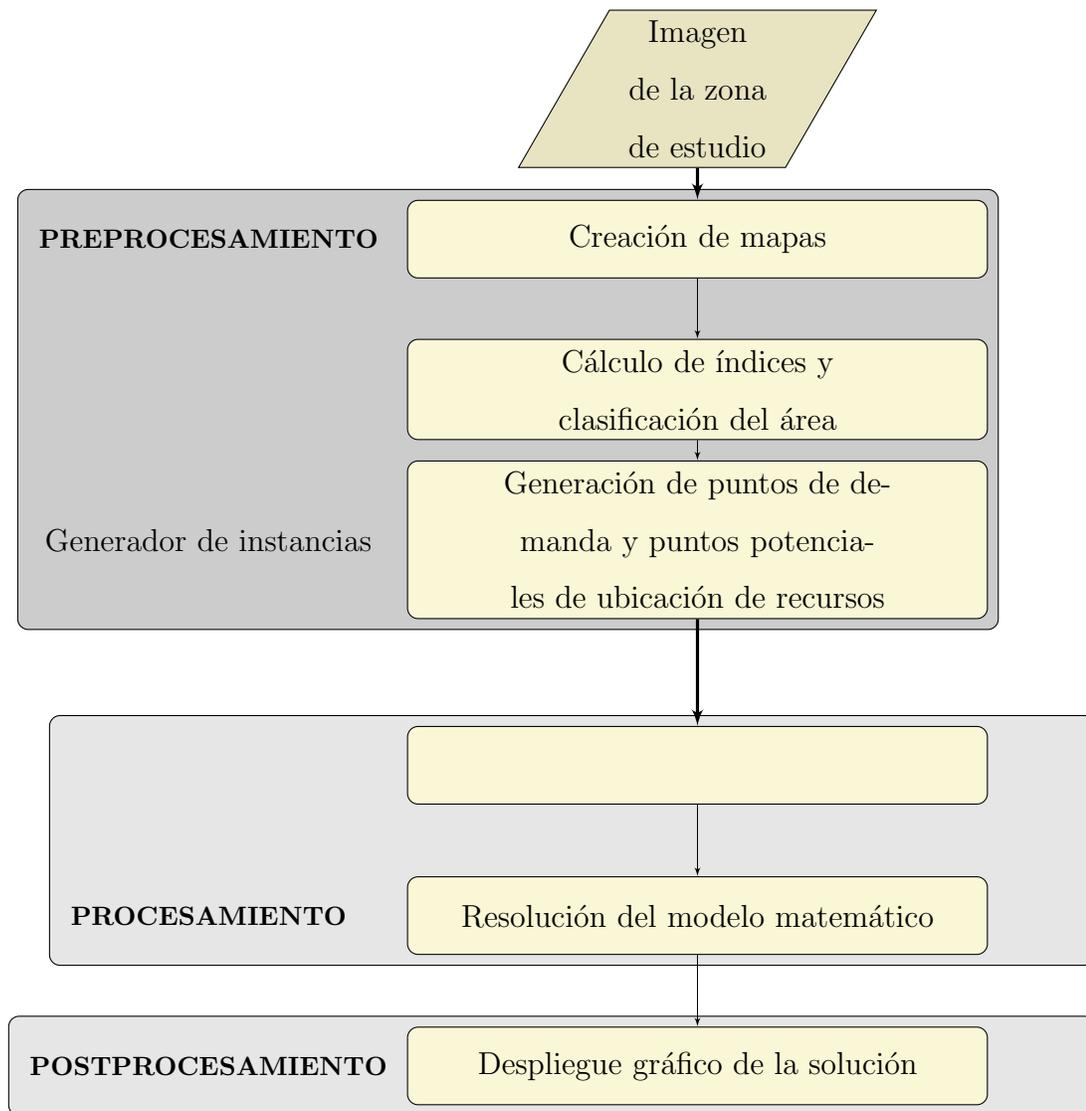


Figura 4.1: Diagrama de flujo de la metodología implementada

## 4.1 PREPROCESAMIENTO

El objetivo de esta fase es generar las instancias del problema para ello se requiere crear los mapas de las zonas de estudio (topográfico y combustibles). En esta fase se explica como crear los mapas que sirven como entrada para la clasificación del área según si índice de peligro potencial. A los mapas resultantes los llamamos mapas de riesgo.

### 4.1.1 CREACIÓN DE MAPAS

#### COMBUSTIBLES

En esta fase se elige una zona de estudio. Los datos son tomados de la infoteca de la Semarnat <http://infoteca.semarnat.gob.mx/website/geointegrador/mviewer/viewer.htm>. Esta infoteca nos permite manipular el mapa de la República Mexicana, elegir alguna zona en la que estamos interesados y clasificar por tipo de vegetación. En la Figura 4.2 se muestra la interfaz del mapa en línea de la Semarnat, aplicando la capa de clasificación por su tipo de vegetación. Se debe elegir la zona que se requiere estudiar y tomar la imagen de su vegetación [2].

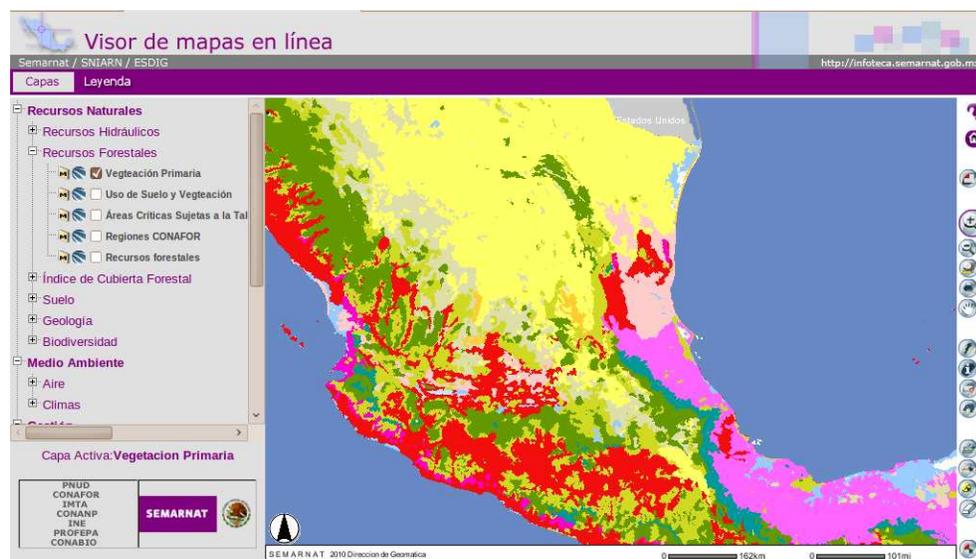


Figura 4.2: Mapa digital

Debido a que solo se puede tomar la imagen de la vegetación de la zona de estudio, es decir, no están georreferenciadas (no conocemos sus coordenadas). Se debe realizar la construcción del mapa de vegetación georreferenciado por medio de un SIG. En nuestro caso hacemos uso del SIG Arc Map 9.1.

### TOPOGRÁFICO

Como ya se mencionó en el Capítulo 2, un factor importante que afecta el comportamiento del fuego es la topografía. El mapa topográfico es uno de los parámetros de entrada para crear los mapas de riesgo, éste al igual que el mapa de combustible se debe crear por medio de un SIG. Los mapas topográficos contienen la información de las pendientes y el porcentaje de inclinación. Existen bases de datos que contienen los datos topográficos de todo el mundo.

Para realizar el mapa topográfico se toman las pendientes de las bases de datos existentes, los datos son abiertos en el SIG, y se procede a la clasificación de las pendientes. Esto se debe a que por lo general los mapas obtenidos en las base de datos existentes están clasificados según los metros de altura sobre el nivel del mar. Para nuestro estudio requerimos el porcentaje de pendiente es por eso que se hace la reclasificación. Al final se obtiene un mapa de pendientes clasificada en 5 rangos (0-15 %, 15-30 %, 30-45 %, 45-60 %, 60+ ). Para ilustrar se muestran en la Figura 4.3 los porcentajes de pendientes.

### CARRETERAS

Para la creación de los mapas de carretera basta con conocer y tener la imagen de las carreteras. La imagen de las carreteras nos sirve como referencia y se usa como base para realizar el mapa georreferenciado. El mapa de carretera es importante en el cálculo del índice de movilidad que es un parámetro requerido al calcular el índice de dificultad de extinción, ya que se debe conocer la capacidad de accesos que se ofrece a través de las carreteras.

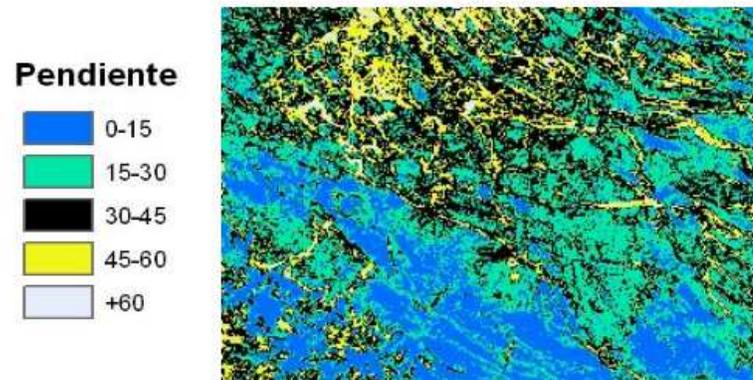


Figura 4.3: Clasificación por el porcentaje de pendiente

Una vez creado el mapa de carreteras se hace una reclasificación según el kilometraje, el mapa es llamado mapa de densidades viales. En este mapa se realiza una cuadrícula que contiene la información del número de kilómetros por cada cuadro en la malla. El mapa de densidades viales sirve como entrada para la etapa donde se construye el modelo matemático para saber que puntos pueden ser cubiertos según la densidad vial.

#### 4.1.2 CLASIFICACIÓN DEL ÁREA POR ÍNDICE DE PRIORIDAD DE DEFENSA

Como hemos mencionado en el Capítulo 3, el índice de prioridad de defensa es la suma del índice de dificultad de extinción ( $I_{dex}$ ) y del índice de peligro potencial ( $I_{pp}$ ) que a su vez es el resultado de la suma de tres componentes: el subíndice de ignición  $I_g$ , subíndice de comportamiento dinámico  $I_{cd}$  y el subíndice energético  $I_{ce}$ . La información aportada por ellos representa las tres fases que caracterizan la organización y consolidación de la combustión en presencia del incendio forestal.

Para realizar el cálculo del índice de prioridad de defensa se requiere como entrada el mapa de pendientes y combustibles así como la temperatura, humedad,

velocidad del viento y el mes de estudio y hora.

Se ha creado la herramienta Índice de Prioridad de Defensa y Modelación Matemática (IPDMM), que en uno de sus módulos realiza los cálculos del índice de prioridad de defensa. Una vez calculado de este índice, se genera automáticamente el mapa de riesgo como se muestra en la figura 4.4.

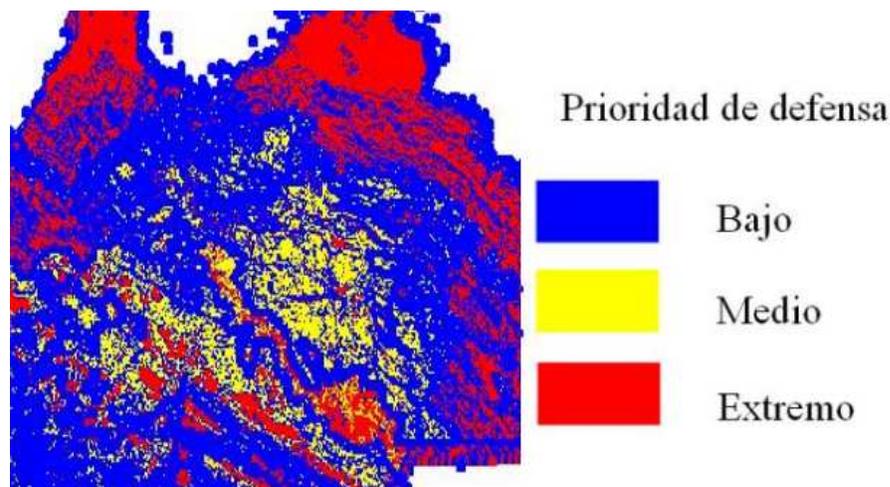


Figura 4.4: Mapa de riesgo

En la figura 4.4 se puede observar en color azul el área que tiene un índice de prioridad de defensa bajo, el índice de prioridad de defensa medio está representado en amarillo y por último el alto en rojo.

### 4.1.3 GENERACIÓN DE PUNTOS DE DEMANDA Y PUNTOS POTENCIALES DE UBICACIÓN DE VEHÍCULOS EXTINTORES

En esta etapa se crea el conjunto de zonas candidatas para la instalación de recursos  $I$ , el conjunto de puntos de demanda  $J$ , y el conjunto  $N(j, k)$  definidos en el Capítulo 3.

El conjunto de puntos de demanda  $J$  depende de la superficie de cada clase. Los puntos de demanda se generan según el índice de peligro potencial de la zona. Si

un área tiene un índice alto de peligro entonces existirán más puntos de demanda. Los puntos de demanda son más cercanos en zonas de mayor peligro y estarán más distanciados en zonas de menor peligro.

Los puntos de demanda generados son al mismo tiempo los puntos potenciales de ubicación de vehículos, es decir, el conjunto  $I$ . No necesariamente todos los puntos de demanda son potenciales para la ubicación, ya que depende de las condiciones del suelo. Algunos puntos pueden ser excluidos del conjunto de lugares candidatos debido a razones prácticas, como por ejemplo: la mala visibilidad, si no se encuentra algún camino para llegar a otros puntos, si existe una pendiente intramitable, etc.

El propósito de esta etapa es obtener los tres conjuntos  $I$ ,  $J$ ,  $N(j, k)$ , dado el mapa de zona de riesgo (explicado en la sección anterior) y la distancia en kilómetros para el malleo se desea. Al crear estos conjuntos hacemos uso de dos matrices: tipo de área  $TA$  y puntos de demanda  $PD$ . La matriz  $TA$  almacena para cada vértice del malleo el tipo de área que hay en ese punto, siendo 1, 2 y 3 para la clase 1, 2 y 3 respectivamente y -1 para otro caso. La matriz  $PD$  tendrá 1 en cada vértice donde se coloque un punto de demanda y -1 en otro caso. Para obtener los conjuntos  $I$ ,  $J$  y  $N(j, k)$  se usa el siguiente algoritmo :

---

**Pseudocódigo 1** Algoritmo de generación de instancias

---

**Entrada:** Tamaño de la distancia del malleo

Imagen de estudio

**Salida:** Instancia del problema

- 1: Abrir la imagen de estudio.
  - 2: Introducir la distancia mínima para el malleo.
  - 3: Crear matriz  $TA$ .
  - 4: Crear los conjuntos  $I, J$ .
  - 5: Crear el conjunto  $N(j, k)$
-

## EJEMPLO ILUSTRATIVO

Supongamos que tenemos una imagen que fue previamente clasificada por la importancia de la zona como en la Figura 4.5.

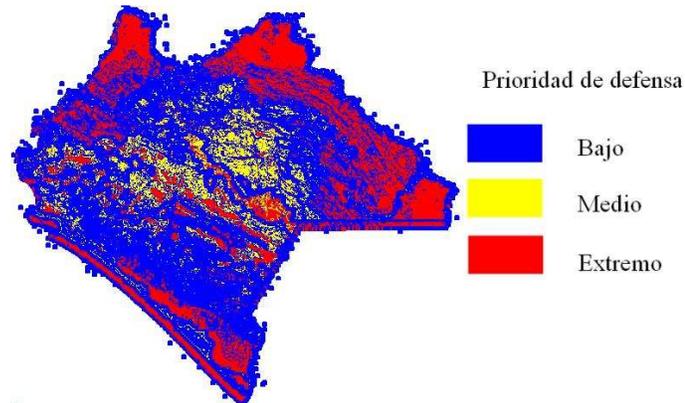


Figura 4.5: Mapa de riesgo por importancia de la zona

### 1. Abrir la imagen de estudio

Al abrir la imagen de estudio, esta ya contiene las dimensiones a lo largo y ancho de la imagen. Para nuestro ejemplo la zona de estudio real tiene un largo de 255 km y 225km de ancho .

### 2. Introducir la distancia mínima para el malleo

Como ya se mencionó en el capítulo 3 la mínima distancia para que un vehículo pueda cubrir a un punto de demanda de la zona 1 es de 15 km, este dato se introduce por el usuario. Aunque se recomienda 15 km, el usuario puede introducir cualquier otra distancia según sus necesidades. Para nuestro ejemplo la longitud a lo largo es de 210 km con lo cual habrá 14 divisiones en el malleo (Veáse la Figura 4.6).

### 3. Crear matriz tipo de área $TA$

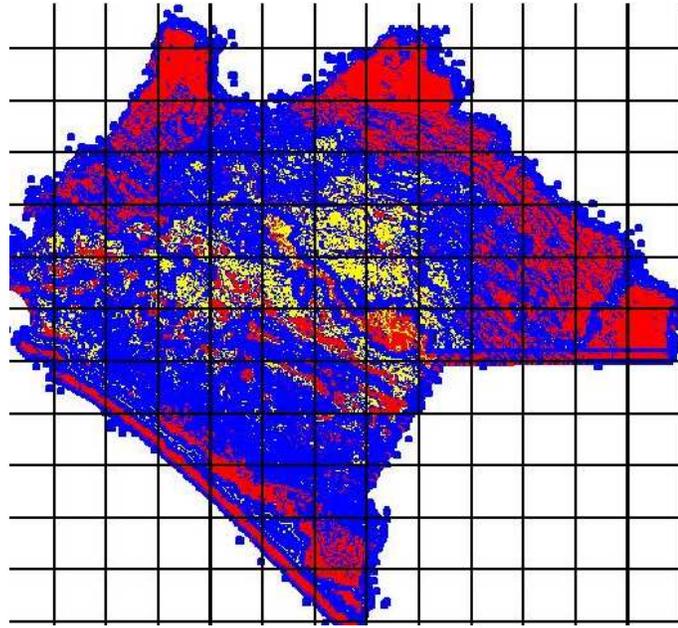


Figura 4.6: Malleo del mapa de riesgo

El objetivo de esta matriz es almacenar el tipo de área que existe en cada vértice del malleo. La matriz se inicializa en -1 para todas sus componentes. Posteriormente se explora cada vértice del malleo y se almacenará 1 en caso de pertenecer a la zona de clase 1, 2 para la clase 2 y 3 para la clase 3.

Siguiendo el ejemplo de la Figura 4.6, al explorar el primer punto potencial de demanda comparamos si pertenece a clase 1, si es así modifica la matriz  $TA$  (tipo de área) y almacena 1. Lo mismo se hace para cada vértice del malleo. Ahora bien, si nos fijamos en la coordenada (2,4) pertenece a la clase 3, entonces almacenamos en la matriz 3, en la posición (2,4).

La matriz  $TA$  para la Figura 4.6 nos queda de la siguiente forma.

$$TA = \begin{pmatrix} -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & 3 & 3 & -1 & -1 & 3 & 3 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 3 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & 3 & 1 & 3 & 3 & 2 & 3 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 3 & 1 & 1 & 1 & 3 & 3 & 2 & 2 & 3 & 1 & 3 & -1 & -1 \\ 3 & 3 & 1 & 2 & 2 & 3 & 2 & 2 & 3 & 3 & 1 & 1 & 1 & -1 \\ -1 & 3 & 3 & 2 & 3 & 1 & 3 & 3 & 1 & 3 & 1 & 1 & 1 & 3 \\ -1 & 3 & 3 & 2 & 2 & 2 & 3 & 2 & 1 & 1 & 3 & 3 & 1 & 3 \\ -1 & -1 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & 3 & 3 & 3 & 3 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 3 & 3 & 3 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 3 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 3 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \end{pmatrix}$$

#### 4. Crear la matriz $PD$

Para crear la matriz  $PD$  tomamos la información de la matriz  $TA$ . Los puntos de demanda serán más cercanos en la clase 1 porque requiere mayor protección ya que es la del índice de peligro potencial alto. Para el caso donde el índice de peligro potencial es medio o bajo los puntos de demanda estarán a mayor distancia que en la clase 1. Esto se debe a que se requiere que los recursos se ubiquen en las zonas de mayor peligro.

La matriz  $PD$  contiene 1 en la coordenada del vértice del malleo donde se colocará un punto de demanda. La cantidad de puntos de demanda depende de la superficie de cada clase, es decir si hay mayor superficie de la clase 1 habrá más puntos de demanda. En caso contrario, si hay más superficie en la clase 3, la cantidad de puntos de demanda es menor, debido a que en la clase 3 los puntos de demanda

están más distanciados.

### 5. Crear los conjuntos $I$ y $J$

El conjunto  $J$  definido en el Capítulo 3, es el conjunto de puntos de demanda, éstos son tomados de la matriz  $PD$ . Para nuestro ejemplo en la matriz tenemos 37 puntos de demanda. Se puede visualizar el número de puntos de demanda en la figura 4.7, donde se puede observar que en la clase de mayor riesgo (color rojo) existen más puntos de demanda, pero para la clase de menor riesgo (color azul) los puntos de demanda están más distanciados.

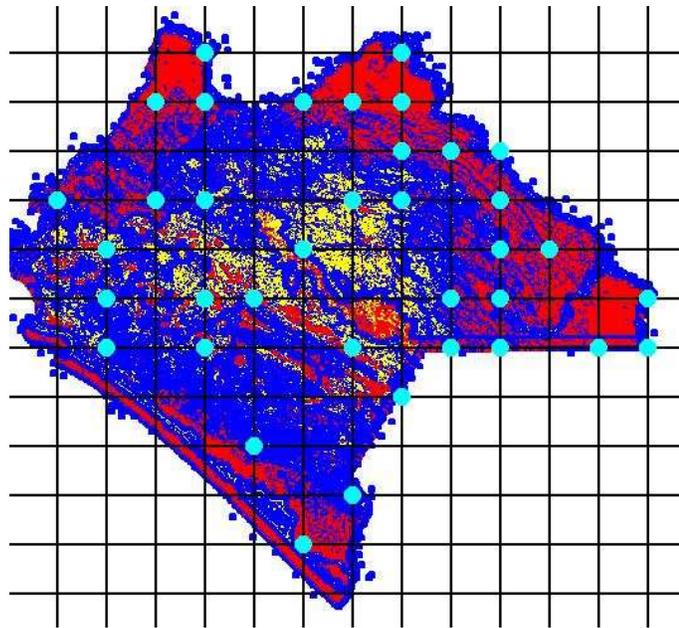


Figura 4.7: Puntos de demanda

El conjunto  $I$  es el conjunto de zonas candidatas para la ubicación de los recursos que son al mismo tiempo los puntos de demanda. En caso que no se pueda ubicar en algún punto por algún factor antes mencionado, se elimina este punto del conjunto. En este ejemplo suponemos que en todos los puntos de demanda es factible colocar una brigada.

El pseudocódigo 1 describe la manera de crear los puntos de demanda dependiendo del tipo de área.

---

**Pseudocódigo 2** Generar puntos de demanda

---

**Entrada:**  $TA$ : Matriz de clasificación de la zona de dimensión  $m \times n$ ; $PD$ : Matriz de puntos de demanda de dimensión  $m \times n$ ;**Salida:**  $PD$ : Matriz de puntos de demanda modificada;

```
1: for all  $j = 1$  hasta  $m$  do
2:   for all  $k = 1$  hasta  $n$  do
3:     if  $((TA(j, k) == 1))$  then
4:        $PD(j, k) \leftarrow 1$ ;
5:     else if  $((TA(j, k) == 2))$  then
6:       Explorar puntos de demanda dentro del radio para la zona 2
7:        $PD(j, k) \leftarrow 1$ ;
8:     else if  $((TA(j, k) == 3))$  then
9:       Explorar puntos de demanda dentro del radio para la zona 3
10:       $PD(j, k) \leftarrow 1$ ;
11:    end if
12:  end for
13: end for
14: Regresar:  $PD$ .
```

---

### 6. Crear el conjunto $N(j, k)$

Para el cálculo del conjunto  $N(j, k)$  se requiere conocer las matrices  $TA$  y  $PD$ , así como también la tabla de densidades viales. Las matrices  $TA$ ,  $PD$  fueron descritas anteriormente.

La tabla de densidades viales indica si un vehículo de brigadas puede cubrir un punto de demanda dependiendo de la clase a la que pertenece y la densidad vial dentro de un radio determinado. La Tabla 4.1 indica los puntos de demanda de cada clase que pueden ser cubiertos según su densidad vial. Por ejemplo, para los puntos de demanda que se encuentren en la clase 1 solo puede ser cubierto si en un radio determinado se encuentra un tipo de densidad vial 3 y 4. Para el caso de un punto de demanda de clase 2, este no puede ser cubierto si en un radio determinado existe solo el tipo de densidad vial 1.

Tabla 4.1: Densidad vial que pueden cubrir puntos de demanda según el tiempo permitido

| Densidad vial | Cubre punto de la clase |   |   |
|---------------|-------------------------|---|---|
|               | 1                       | 2 | 3 |
| 1             | ✗                       | ✗ | ✓ |
| 2             | ✗                       | ✓ | ✓ |
| 3             | ✓                       | ✓ | ✓ |
| 4             | ✓                       | ✓ | ✓ |

Por ejemplo, si un punto de demanda se encuentra en la clase 2, el conjunto  $N(j, k)$  es igual a todos los puntos potenciales que se encuentran dentro del radio de cobertura y la densidad vial sea mayor o igual a 2 (como se muestra en la tabla). Si tenemos un punto de demanda en la clase 1, el conjunto  $N(j, k)$  es igual a todos los puntos potenciales que se encuentran dentro del radio de cobertura y la densidad vial sea mayor o igual a 3.

## 4.2 PROCESAMIENTO

Como se expuso en el capítulo anterior, el modelo matemático que representa nuestro problema se define como un Programa Entero Mixto Lineal (PEML). Un PEML es un modelo en el que tanto las restricciones como la función objetivo son funciones lineales y las variables de decisión son algunas enteras y otras continuas.

El método de solución empleado para la resolución de este problema es el de ramificación y acotamiento (MRA). El MRA es uno de los métodos más populares y utilizados en la resolución exacta de problemas de programación entera [25]. El método consiste en ir acotando superior e inferiormente el valor de la función objetivo hasta que ambas cotas sean iguales, es decir, se haya llegado al valor óptimo.

El MRA toma cada problema de programación lineal entera y para su solución se divide en dos subproblemas; para cada subproblema puede ocurrir lo siguiente:

1. Cuando el problema es no factible se da por terminado.
2. La solución es entera mejor que cualquier solución entera conocida, es candidata a solución; en este caso no se busca más.
3. Es fraccionario mejor que la solución entera conocida más adecuada, se parte en dos este problema.

La idea principal del MRA es encontrar la solución óptima y probar su optimalidad mediante el particionamiento sucesivo del conjunto de soluciones factibles, analizando la evaluación de la función objetivo en cada problema generado, y estableciendo las respectivas cotas. Dichas acotaciones son utilizadas para evitar búsquedas exhaustivas en el espacio de solución, si se sabe que no mejoran el valor óptimo de la solución factible obtenida hasta el momento. En algún punto durante el proceso de solución, el estado de la solución con respecto a la búsqueda del espacio de soluciones es descrito por un almacén de subconjuntos inexplorados de dichas soluciones y la mejor solución más lejos encontrada. Los subespacios inexplorados son representados

como nodos en un árbol de búsqueda generado dinámicamente, el cual inicialmente sólo contiene a la raíz, y cada iteración del método clásico procesa uno como nodo.

La forma de trabajar del método permite tener cierto control sobre algunos de sus parámetros, con el fin de ayudar al método a encontrar resultados que sean óptimos y obtenidos en tiempos razonables. Uno de estos parámetros es el de dar o no prioridad a las variables. Para las instancias que se probaron no se modificó ninguno de los parámetros de este método ya que los tiempos de solución son muy bajos. En el caso de que se llegara a tener instancias donde el tiempo de cómputo sea alto se garantiza que la solución dentro de un tiempo límite será la mejor solución encontrada hasta el momento con este método.

Ahora bien, existen diversas implementaciones del MRA. Algunos son de tipo software libre otras de tipo comercial. En nuestro caso, se hace uso de Cplex que es uno de los optimizadores más potentes a nivel mundial en la resolución de problemas lineales y enteros mixtos. Las instancias se realizaron en a C++ con Cplex 11.2, con el método de ramificación y acotamiento [28].

### 4.3 POSTPROCESAMIENTO

Una vez que el método encuentra una solución, los resultados pueden ser manipulados por la herramienta, en esta se puede visualizar la solución gráficamente. En la parte de visualización de resultados se observan los puntos de demanda que quedaron sin cubrir, los cubiertos y la ubicación de las brigadas.

Para ilustrar esta visualización tenemos la Figura 4.8, donde para un problema existen 44 puntos de demanda y 6 brigadas, se ha llegado a una solución donde 29 puntos de demanda son cubiertos, es decir el 65 % de puntos cubiertos. El visualizador permite observar los puntos de demanda cubiertos y las ubicaciones de los vehículos. En color azul tenemos los puntos de demanda que no fueron cubiertos, en negro los puntos de demanda que son cubiertos por al menos una brigada y finalmente en verde la ubicación óptima de las 6 brigadas.

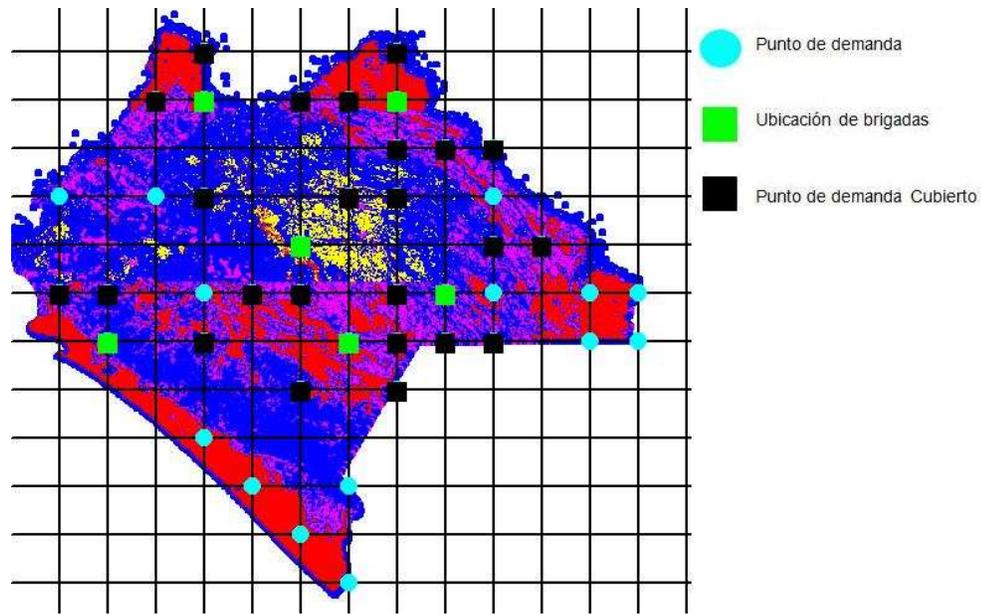


Figura 4.8: Ilustración de una solución óptima a través del visualizador

A manera de resumen el siguiente diagrama de la Figura 4.9 ilustra la metodología que se sigue para resolver nuestro problema. La imagen 4.9(a) muestra el mapa de riesgo que fue creado en el preprocesamiento, en la figura 4.9(b) se muestra el malleo que se hace a la zona de estudio con todos los puntos potenciales de demanda y los puntos potenciales de ubicación de recursos. En la imagen 4.9(c) se muestran los puntos definitivos de demanda. Finalmente en la última imagen se muestra la solución al modelo matemático.

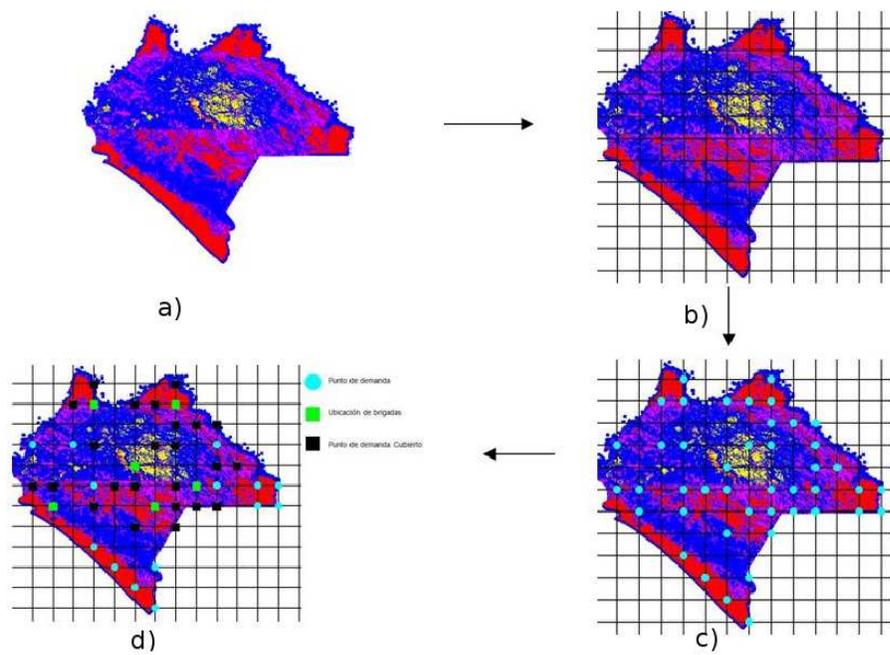


Figura 4.9: Secuencia de la metodología de solución

## CAPÍTULO 5

# RESULTADOS COMPUTACIONALES

---

En el presente capítulo ilustra la metodología descrita en el Capítulo 4 en la resolución de un caso estudio en el estado de Chiapas, México. En primera instancia se describen los objetivos de la experimentación. Posteriormente se explican los escenarios de prueba y el ambiente de experimentación y se discuten los resultados obtenidos.

## 5.1 OBJETIVOS

A continuación se enlistan los objetivos principales que se persiguen mediante esta experimentación, con el propósito de mostrar la valía de la herramienta con la metodología empleada.

- Cálculo de los índices de peligro de incendios.
- Analizar las soluciones para diferentes escenarios climatológicos.
- Mostrar la eficiencia de la herramienta proporcionada.

## 5.2 CASO DE ESTUDIO

El estado de Chiapas se ubica en el sureste de la república mexicana, ocupando una superficie de 73,211 km<sup>2</sup>. Geográficamente se localiza entre los 17°59' y 14°32' latitud norte, y entre los 90°22' y 94°14' de longitud oeste.



Figura 5.1: Mapa del área de estudio

En este apartado se pretende ilustrar la metodología presentada en el Capítulo 4 en la sección de la creación de mapas. De manera breve se describirá como se realizó para el caso estudio. En la figura 5.2 se muestra la creación del mapa de vegetación georeferenciado usando el SIG Arc Map. En la primera y segunda imagen se muestra la construcción del mapa donde se va separando cada tipo de vegetación, en la tercera imagen se muestra la vegetación clasificada y georeferenciada. Finalmente en la cuarta imagen se muestra el mapa de vegetación distinguiendo cada modelo por diferente color.

Los datos para crear el mapa topográfico han sido tomados de <http://www.maplibrary.org/stacks/Central America/Mexico>. Los datos vienen en tramos de 10km con lo cual se deben de unir hasta formar toda la zona de estudio. En Figura 5.3 se muestra las etapas de su creación. En las dos primeras imágenes de la Figura se puedes observar las uniones de los primeros datos, en la tercera figura se aprecia únicamente la zona de estudio con los datos recolectados. En la última imagen se obtiene el mapa topográfico reclasificado según el porcentaje de las pendientes mencionados en el Capítulo 4.

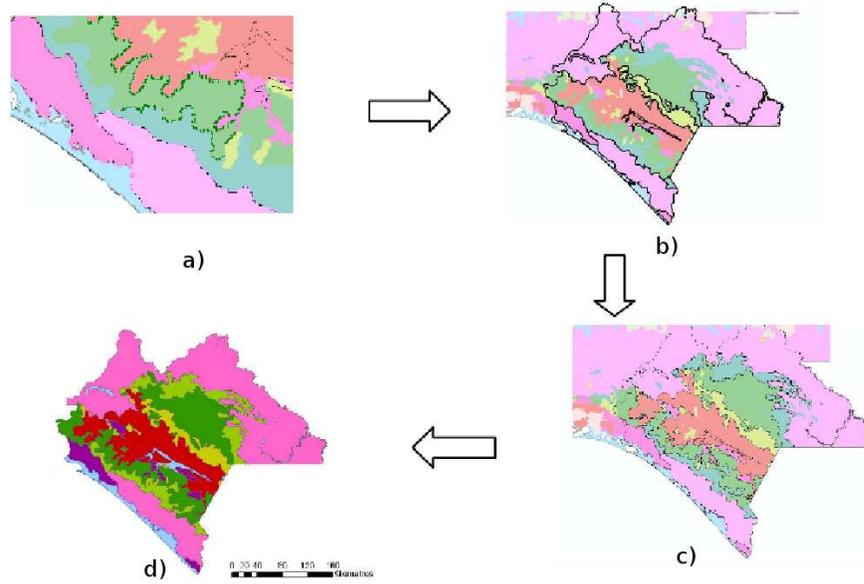


Figura 5.2: Etapas de construcción del mapa vegetación.

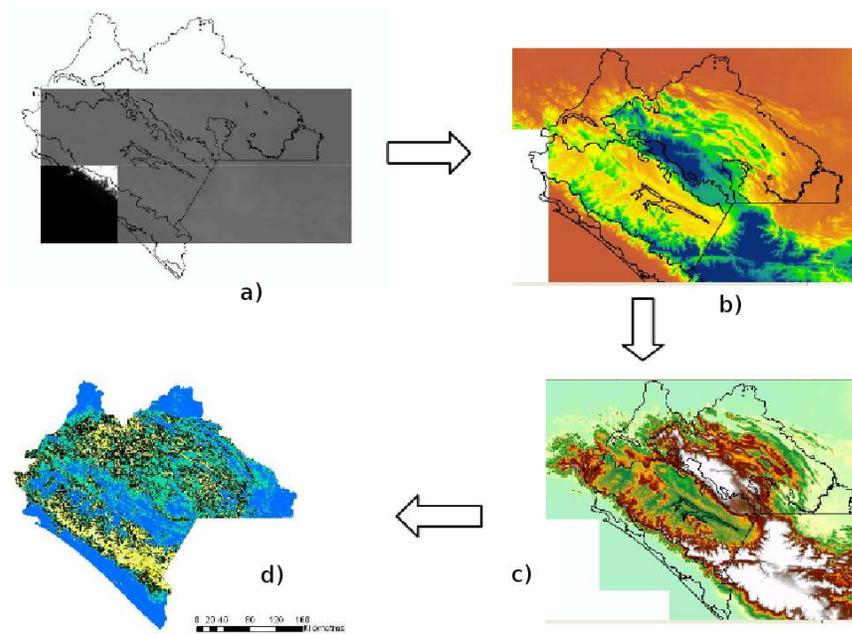


Figura 5.3: Etapas de construcción del mapa de pendientes.

### 5.3 AMBIENTE DE DESARROLLO

El ambiente de experimentación se refiere al ambiente computacional y comprende principalmente las herramientas que se utilizaron para implementar la metodología desarrollada.

Para la programación de la herramienta IPDMM se eligió Lazarus como lenguaje de programación a utilizar, debido a su facilidad para manipular imágenes, Lazarus es una herramienta de desarrollo rápido de aplicaciones (RAD) basada en el lenguaje de programación Object Pascal, disponible para los sistemas operativos Windows, GNU/Linux y Mac OS X. Se trata de una alternativa libre y gratuita a Delphi, desarrollada como proyecto de software libre a partir de Free Pascal.

Lazarus es compatible con varios motores de bases de datos, sin embargo el desarrollador debe instalar paquetes adicionales para gestionar cada uno. El programador puede acceder a la base de datos mediante código o bien arrastrando componentes en un formulario visual. La ventaja de la compatibilidad con la base de datos es la facilidad con la que se podrían incorporar datos para el modelo y hacer de la herramienta un sistema aun más robusto.

Como se mencionó en el Capítulo 2, los sistemas de información geográfica (SIG) son herramientas de trabajo para entender nuestro mundo, aplicar conocimiento geográfico para resolver problemas, y guiar el comportamiento humano. Un SIG puede producir información que responda a preguntas específicas y permita compartir dicha información con otros. Hemos recurrido a esta herramienta para procesar datos de nuestro estudio que nos permitan trabajar con los mapas que se procesan en el SIG. El programa que se utilizó es ArcMap 9.1 [2].

El problema de programación entera, se resolvió por medio del método de ramificación y acotamiento de las bibliotecas de optimización para C++ de CPLEX [28] en su versión 11.2.

## 5.4 GENERACIÓN DE ESCENARIOS DE PRUEBA

Para evaluar el desempeño de la metodología bajo ciertas condiciones meteorológicas se procede a generar diferentes escenarios de pruebas. Los escenarios de prueba utilizados en la experimentación varían de 8 formas distintas, cada instancia tiene diferente temperatura, humedad y velocidad del viento. Dependiendo de las condiciones meteorológicas tendremos diferentes índices, el cual generará un mapa diferente que a su vez, determinará el número de puntos de demanda.

La tabla 5.1 muestra las diferentes variaciones a las condiciones meteorológicas como son: la temperatura (T), humedad (H), velocidad del viento (V) y donde *b* es baja y *a* es alta. Para la temperatura (T) consideramos baja menor si es de 0-5°C y alta de 35-40°C. La humedad es baja 0-10 % y alta 80-100 %. La velocidad del viento es baja cuando es 0-4 km/h y alta si es de 20- 24 km/h.

Tabla 5.1: Escenarios de prueba para diferentes condiciones meteorológicas.

| Escenario | T | H | V |
|-----------|---|---|---|
| 1         | b | b | b |
| 2         | b | b | a |
| 3         | b | a | b |
| 4         | b | a | a |
| 5         | a | b | b |
| 6         | a | b | a |
| 7         | a | a | b |
| 8         | a | a | a |

## 5.5 CÁLCULO DEL ÍNDICE DE PELIGRO POTENCIAL DE INCENDIOS

En el Capítulo 3 se describe el cálculo de este índice. Para el cálculo de este índice, como ya se mencionó en el capítulo 3, se requiere como entrada la temperatura, humedad, velocidad del viento, así como también el mes de estudio y hora.

En la tabla se muestran los resultados obtenidos para diferentes escenarios con las siguientes características: mes mayo-junio, a las 13:00 hrs. Estas condiciones meteorológicas provocan que se inicie y propague el fuego rápidamente.

En la Tabla 5.2 se muestran los resultados. Para los escenarios 2 y 6 se puede observar un Ipp alto; esto se debe a que se tiene humedad baja y velocidad del viento alta lo cual nos indica que estas son las condiciones meteorológicas más peligrosas. Por el contrario, las condiciones meteorológicas para que se genere un Ipp bajo se muestran en los escenarios número 3 y 7 donde en ambos se tiene una humedad alta y velocidad del viento baja.

Tabla 5.2: Índice de peligro potencial, según diferentes condiciones meteorológicas

| Escenario | T | H | V | Ipp   |
|-----------|---|---|---|-------|
| 1         | b | b | b | 0.364 |
| 2         | b | b | a | 1.291 |
| 3         | b | a | b | 0.312 |
| 4         | b | a | a | 0.775 |
| 5         | a | a | b | 0.364 |
| 6         | a | a | a | 1.398 |
| 7         | a | a | b | 0.312 |
| 8         | a | a | a | 0.775 |

Con el propósito de ilustrar el comportamiento del índice de peligro potencial en condiciones favorables se ha realizado un gráfico en la sección de reportes de la herramienta IPDMM. El escenario de prueba es el 3 y los resultados para cada modelo de combustible son mostrados en la Figura 5.4. En la Figura se puede ver que el Ipp más alto es de 1.12 para el modelo de combustible 5.

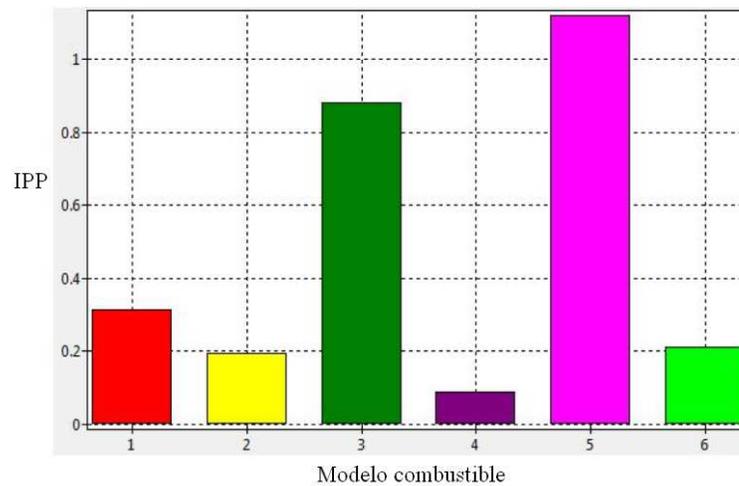


Figura 5.4: Índice de peligro potencial, escenario 3

En caso contrario del escenario de condiciones favorables, se observa el comportamiento del índice de peligro potencial en condiciones extremas en la Figura 5.5, este gráfico también se ha realizado en la sección de reportes de la herramienta IPDMM, el escenario de prueba es el 6 ya que estas son condiciones desfavorables. Nótese que de acuerdo a la tabla 5.2 el índice de peligro potencial se ve reflejado como alto para todos los modelos de combustible.

## 5.6 CÁLCULO DEL ÍNDICE DE DIFICULTAD DE EXTINCIÓN

En el Capítulo 3 se describe la formulación del cálculo de este índice. Para realizar el cálculo seguimos el procedimiento que hemos realizado para evaluar la eficiencia del Ipp, esto es, se ha variado la temperatura, humedad y velocidad del

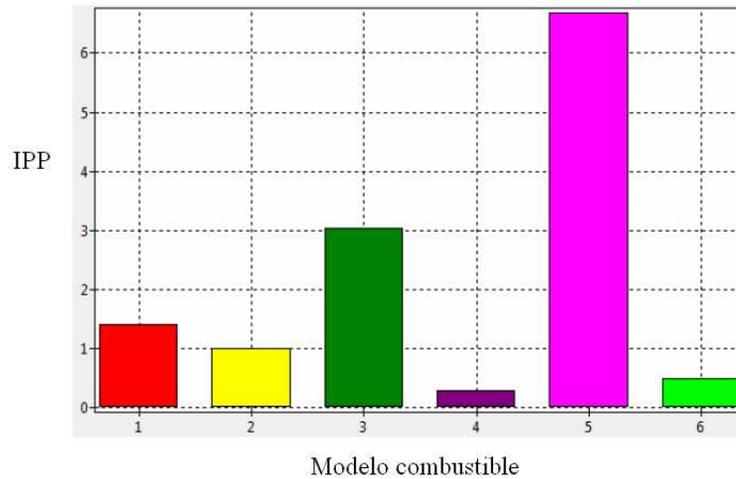


Figura 5.5: Índice de peligro potencial para condiciones meteorológicas desfavorables viento. El cálculo realizado para los diferentes escenarios toma como parámetros de entrada: mes mayo-junio y hora de estudio las 13 horas.

En la Tabla 5.3 se puede ver los resultados según diferentes escenarios. Por ejemplo, para los escenarios 2 y 6 se puede observar un Idex alto; esto se debe a que en ambos se tiene una humedad baja y velocidad del viento alta. Por el contrario, las condiciones meteorológicas que generan como resultado un Idex bajo se muestran en los escenarios 3 y 7 donde se tiene una humedad alta y velocidad del viento baja.

Tabla 5.3: Índice de dificultad de extinción, según diferentes condiciones meteorológicas

| Escenario | T | H | V | Idex  |
|-----------|---|---|---|-------|
| 1         | b | b | b | 1.707 |
| 2         | b | b | a | 8.730 |
| 3         | b | a | b | 1.502 |
| 4         | b | a | a | 7.776 |
| 5         | a | b | b | 1.707 |
| 6         | a | b | a | 8.730 |
| 7         | a | a | b | 1.502 |
| 8         | a | a | a | 7.776 |

## 5.7 EXPERIMENTO C: ÍNDICE DE PRIORIDAD DE DEFENSA (IPD).

La formulación del cálculo del índice de prioridad de defensa se encuentra descrito en el Capítulo 3. Para realizar la experimentación realizamos el procedimiento parecido al de los índices anteriores. Se ha variado las condiciones meteorológicas como se definieron en un principio.

Los resultados de este índice tienen un comportamiento similar a los índices anteriores esto se debe a que es la suma ponderada de los dos anteriores. Se ha realizado la experimentación para el modelo de combustible 3, en los meses mayo-junio a las 13 horas.

En la Tabla 5.5 se puede observar un Ipd alto para los escenarios 2 y 6 esto se debe a una humedad baja y velocidad del viento alta. El Ipd más bajo se observa en el escenario 7 donde tanto temperatura como velocidad del viento es baja pero una humedad alta. Los rangos de peligro mostrados en la última columna han sido descritos en el Capítulo 3.

Finalmente, para apreciar el comportamiento de este índice se muestra la comparación de los mapas de prioridad de defensa para los escenarios 3 y 6 en la Figura 5.6 . En el escenario 3 se puede apreciar que existe más área con un Ipd bajo (color azul ). Por el contrario y como se ha analizado anteriormente, para el escenario 6 las condiciones meteorológicas propician una mayor área con peligro medio y alto (amarillo y rojo).

Tabla 5.4: Índice de prioridad de defensa, según diferentes condiciones meteorológicas

| Escenario | T | H | V | Ip <sub>d</sub> | Peligro |
|-----------|---|---|---|-----------------|---------|
| 1         | b | b | b | 0.583           | Bajo    |
| 2         | b | b | a | 1.774           | Alto    |
| 3         | b | a | b | 0.882           | Medio   |
| 4         | b | a | a | 1.575           | Alto    |
| 5         | a | b | b | 0.583           | Bajo    |
| 6         | a | b | a | 1.774           | Alto    |
| 7         | a | a | b | 0.545           | Bajo    |
| 8         | a | a | a | 1.575           | Alto    |

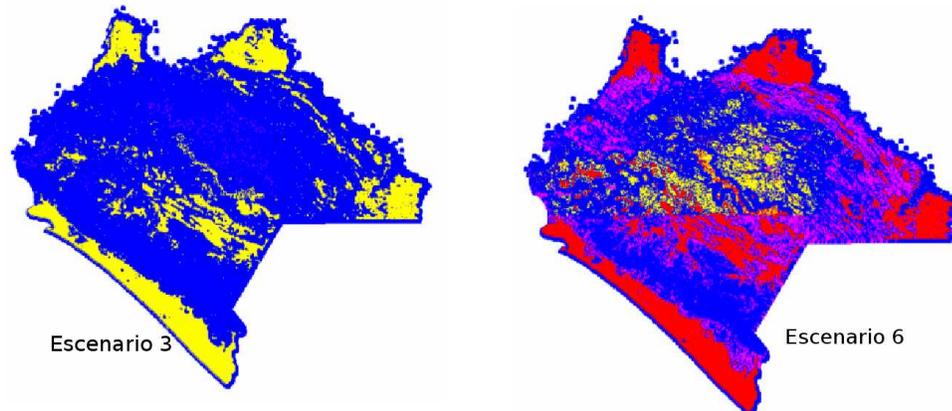


Figura 5.6: Mapas de Índice de prioridad de defensa, escenarios 3 y 6

## 5.8 EXPERIMENTO D: APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA AL CASO DE ESTUDIO BAJO DIFERENTES CONDICIONES METEOROLÓGICAS

Los objetivos de de este experimento son:

- Observar el comportamiento del conjunto de puntos de demanda variando las condiciones meteorológica.

- Observar el valor de la función objetivo para diferente número de brigadas.

#### GENERACIÓN DE INSTANCIAS

Como ya se comentó en el Capítulo 4, el número de puntos de demanda que se generan como entrada al modelo depende del tipo de clasificación del área. Es por eso que cada escenario de prueba tiene distintas condiciones meteorológicas, por lo tanto, tendrá un conjunto de puntos de demanda diferentes. En la Tabla 5.5 se muestran para cada escenario el valor del Ipp para toda la zona de estudio. Éste se obtiene como la suma ponderada de cada mancha del combustible, el porcentaje que ocupa cada tipo de vegetación multiplicado por su Ipp. En la tercera columna se muestra los puntos de demanda generados para tal escenario.

Tabla 5.5: Puntos de demanda según su índice de peligro potencial

| Escenario | T | H | V | Ipp   | Puntos de demanda |
|-----------|---|---|---|-------|-------------------|
| 1         | b | b | b | 0.603 | 28                |
| 2         | b | b | a | 1.781 | 41                |
| 3         | b | a | b | 1.035 | 23                |
| 4         | b | a | a | 1.641 | 33                |
| 5         | a | b | b | 1.913 | 28                |
| 6         | a | b | a | 1.781 | 41                |
| 7         | a | a | b | 1.035 | 26                |
| 8         | a | a | a | 1.682 | 34                |

En la Figura 5.7 se puede observar el mapa de la zona de riesgo con los puntos de demanda para dos escenarios diferentes. El mapa para el escenario 7 muestra que hay menor puntos de demanda esto se debe a que la zona de riesgo en la mayoría es baja, por lo tanto tiene sus puntos de demanda con mayor distancia entre ellos. En el mapa para el escenario 2 existen más puntos de demanda comparado con el escenario 7 debido a que hay mayores zonas de peligro y como se ha mencionado requiere que sus puntos de demanda sean más cercanos.

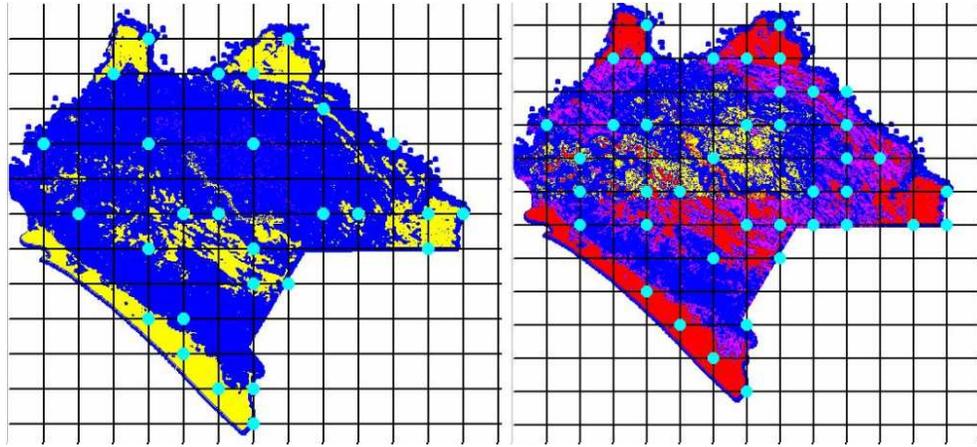


Figura 5.7: Mapas de puntos de demanda para escenarios 7 y 2

#### EVALUACIÓN DEL MÉTODO BAJO DIFERENTES ESCENARIOS

El conjunto de pruebas que se describen a continuación tiene como objetivo principal evaluar las soluciones obtenidas con el modelo de optimización para los diferentes escenarios de prueba. Además que se desea evaluar el desempeño del método de ramificación y acotamiento en la resolución de algunas instancias del modelo.

En este experimento se aplica el MRA al modelo de PEML generado para cada uno de los escenarios de prueba. El MRA se aplicó. La Tabla 5.6 despliega los resultados obtenidos. En las primeras columnas se indica el número de escenario y los diferentes parámetros para las condiciones meteorológicas. En la quinta columna muestra los puntos de demanda generados. Como se describe en el preprocesamiento los escenarios 2 y 6 se generan un mayor número de puntos de demanda debido a que las condiciones son desfavorables, es decir hay zonas de mayor riesgo. En la sexta y séptima columna se muestra el número de puntos de demanda cubiertos y el porcentaje respectivamente de cada una de las instancias resueltas. El mayor porcentaje de puntos cubiertos es para la instancia 4 de aquí se puede observar que los puntos de demanda no influyen directamente en los puntos cubiertos, es decir si se tienen un menor puntos de demanda no necesariamente el porcentaje cubierto será más alto.

Al analizar los valores de la función objetivo hacemos las siguientes observa-

ciones: el valor más alto es el de la instancia 2, sin embargo no coincide con el de mayor porcentaje de puntos cubiertos. Esto se debe a que se ha cubierto puntos de demanda que requerían de una protección mayor, aunque el número de puntos cubiertos no es el más alto si lo es en el valor de la función objetivo.

Tabla 5.6: Porcentaje de puntos de demanda cubiertos, 7 brigadas

| Instancia | T | H | V | P. Demanda | P. Cubiertos | % cubierto | Valor de F.O |
|-----------|---|---|---|------------|--------------|------------|--------------|
| 1         | b | b | b | 28         | 18           | 64.29      | 23           |
| 2         | b | b | a | 41         | 30           | 73.17      | 41           |
| 3         | b | a | b | 28         | 22           | 78.57      | 27           |
| 4         | b | a | a | 33         | 31           | 93.94      | 35           |
| 5         | a | b | b | 28         | 22           | 78.57      | 28           |
| 6         | a | b | a | 41         | 30           | 73.17      | 39           |
| 7         | a | a | b | 26         | 22           | 84.62      | 29           |
| 8         | a | a | a | 34         | 27           | 79.41      | 34           |

Se ha realizado otro estudio para ver el efecto que tiene el incremento del número de brigadas sobre el número de puntos de demanda cubiertos y valor de la función objetivo. Las instancias son generadas basadas en el escenario 3, donde las condiciones meteorológicas son: temperatura alta, humedad alta, velocidad del viento baja. Se creó un conjunto de puntos de demanda de tamaño 28 y se probó para 5,7,9 y 11 brigadas. En la Tabla 5.7 se muestran los resultados de este estudio donde en la primera columna tenemos el nombre de la instancia, en la segunda el número de brigadas. En la quinta y sexta columna indica tanto el porcentaje de puntos de demanda cubiertos y el valor de la función objetivo respectivamente. Como se puede apreciar a mayor número de brigadas disponibles, se tiene un mayor valor en la función objetivo y en el porcentaje de puntos cubiertos, naturalmente. Por ejemplo, si se incrementa de 5 a 9 brigadas el porcentaje de puntos cubiertos se incrementa en un 25% e incrementa el valor de la función objetivo en 7. Se puede observar que el incremento de 5 a 7 brigadas hace que incremente la función objetivo en 5 unidades, pero de 7 a 9 el incremento es solo de 2 unidades, se muestra más sensible para un

menor número de brigadas.

Tabla 5.7: Desempeño de instancia 3 con diferente número de brigadas

| Instancia | N. brigadas | P.Demanda | P. Cubiertos | % Cubierto | Valor de F.O |
|-----------|-------------|-----------|--------------|------------|--------------|
| 3A        | 5           | 28        | 19           | 67.86      | 25           |
| 3B        | 7           | 28        | 24           | 85.71      | 30           |
| 3C        | 9           | 28        | 26           | 92.86      | 32           |
| 3D        | 11          | 28        | 28           | 100        | 34           |

En la Figura 5.8 se observa el valor de la función objetivo, dependiendo del número de brigadas colocadas para el escenario 3.

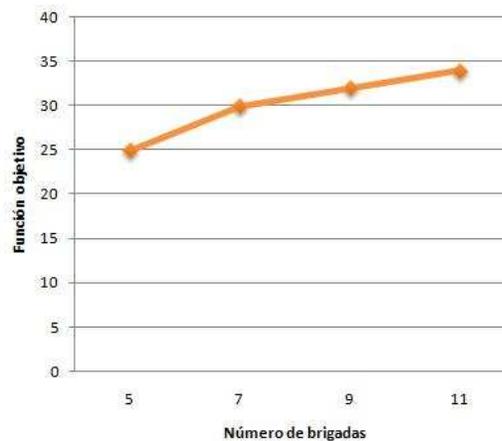


Figura 5.8: Variación de la función objetivo para el escenario 3

El mismo estudio se lleva a cabo para el escenario 2, donde las condiciones meteorológicas son: humedad baja, velocidad del viento alta. En la Tabla 5.8 se muestran los resultados de las instancias generadas del escenario 2. Por ejemplo, si se incrementa de 5 a 9 brigadas el porcentaje de puntos cubiertos se incrementa en un 14.34% e incrementa el valor de la función objetivo en 6.

En la Figura 5.9 se especifica el valor de la función objetivo, como función del número de brigadas colocadas para el escenario 2. Se aprecia el crecimiento de la función respecto al crecimiento del número de brigadas.

Tabla 5.8: Desempeño de instancia 2 con diferente número de brigadas

| Instancia | N.brigadas | P.Demanda | P.Cubiertos | % cubierto | Valor F.O |
|-----------|------------|-----------|-------------|------------|-----------|
| 2A        | 5          | 41        | 28          | 68.29      | 35        |
| 2B        | 7          | 41        | 32          | 78.04      | 39        |
| 2C        | 9          | 41        | 34          | 82.92      | 41        |
| 2D        | 11         | 41        | 36          | 87.80      | 43        |
| 2E        | 13         | 41        | 38          | 92.62      | 45        |
| 2F        | 15         | 41        | 40          | 97.56      | 47        |
| 2G        | 16         | 41        | 41          | 100        | 48        |

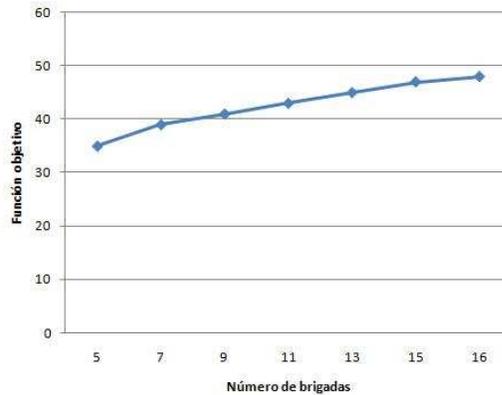


Figura 5.9: Variación de la función objetivo para el escenario 2

En la Figura 5.10 se observa el porcentaje de puntos no cubiertos para el escenario 2, dependiendo del número de brigadas que se coloquen en el estado de Chiapas, y para las condiciones más extremas se requiere de 16 brigadas para cubrir todo el estado, y garantizar un ataque inicial efectivo.

En las instancias que se resolvieron el tiempo de cómputo para la solución del modelo es de 0.2 a 3 segundos. Se ejecutaron resolvieron instancias de hasta 11,000 puntos de demanda, es decir de más de 22,000 variables binarias y el tiempo de cómputo no rebaso los 3 segundos. El tiempo nos garantiza pueden resolver instancias grandes de este problema y obtener soluciones en un tiempo mínimo.

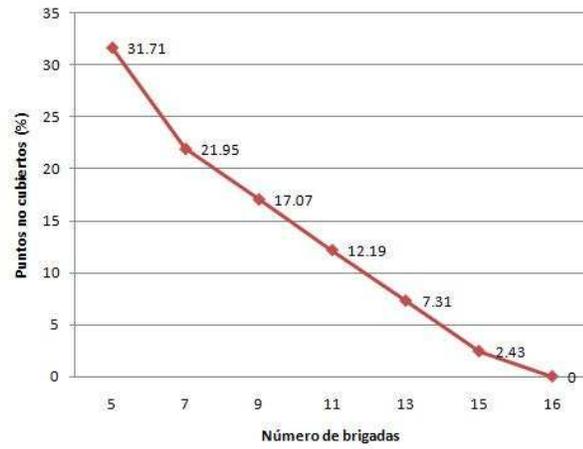


Figura 5.10: Comparación de puntos no cubiertos y número de brigadas colocadas (Escenario 2)

## CAPÍTULO 6

# CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES

## FINALES

---

El presente trabajo de tesis está enfocado a una problemática real proveniente de los incendios forestales en México, cuyo principal problema es cómo ubicar brigadas de ataque a incendios. La realización de este trabajo de investigación comprende, desde el estudio detallado sobre incendios forestales los factores que afectan a estos y su comportamiento hasta la creación de una herramienta. Durante el análisis de la literatura se observó que el problema de incendios forestales es un problema de gran interés en todo el mundo. En particular para México no se ha trabajado hasta donde se tiene conocimiento sobre modelos de optimización en incendios forestales.

Para la modelación matemática del problema se basó en un modelo de la literatura, vale al pena mencionar que se realizaron las adecuaciones pertinentes para hacer uso del mismo. El modelo matemático es un modelo de programación entera mixta. El método de solución que se uso es el método de ramificación y acotamiento.

El estudio computacional del problema se dividió básicamente en dos partes. Primero se procedió a realizar los cálculos de índices de peligro para la creación de mapas de riesgo de peligro de incendios. Segundo, se analizó las soluciones a las instancias para diferentes escenarios.

En este capítulo se resumen las conclusiones en base a los resultados obtenidos en este trabajo. Se presentan las contribuciones y las posibles investigaciones a futuro.

## 6.1 CONCLUSIONES

Durante el desarrollo de esta tesis se logró cumplir satisfactoriamente los objetivos planteados. En una primera etapa se efectuó una búsqueda de la literatura especializada con la finalidad de obtener los conocimientos sobre optimización y los recursos forestales. Se realizó un estudio a fondo del problema de incendios forestales, lo cual permitió obtener un entendimiento de los factores que afectan a estos. Se ha estudiado los efectos desfavorables del fuego sobre los ecosistemas forestales, y su importancia crece a nivel mundial. Si se toman medidas y estudios para conservar los recursos forestales, se produce una degradación progresiva de los mismos.

Se realizó una implementación computacional que integra la metodología desarrollada y se realizó experimentación sobre un conjunto de escenarios. Se observó para diferentes escenarios el comportamiento de los índices de peligro y los mapas generados para mostrar la valía de la metodología implementada.

Se resolvieron instancias bajo diversos escenarios con el fin de investigar los límites de eficiencia del método de ramificación y acotamiento, encontrándose que es capaz de encontrar la solución en un tiempo razonable.

## 6.2 CONTRIBUCIONES

La principal aportación de este trabajo de investigación es el desarrollo e implementación computacional de una herramienta que integra el cálculo de diferentes índices importantes en el comportamiento del fuego y la solución a un problema de ubicación de brigadas en México para incendios forestales nunca antes tratado hasta donde se tiene conocimiento. La herramienta proporciona una base para el inicio de toma de decisiones de ubicación de brigadas. Cabe mencionar que no solo aporta la toma de decisiones sino también proporciona mapas de riesgo. Los mapas de riesgo ayuda a la visualización del área riesgo de presentar incendios forestales. Estos mapas pueden dar pauta a crear programas de prevención en zonas de alto riesgo.

Se ha aplicado la metodología a un caso estudio del estado de Chiapas. Se clasificó el área según los modelos de combustible de Rothermel. Se realizó el cálculo de los diferentes índices del comportamiento del fuego. Se generaron mapas de riesgo para diferentes condiciones meteorológicas. Se realizó un estudio del comportamiento de la función objetivo bajo diferente número de brigadas y el porcentaje de puntos de demanda cubiertos.

Se cuenta ahora con una herramienta que procesa mapas de riesgo, genera instancias y un modulo de visualización de ubicación de brigadas y puntos de demanda cubiertos.

### 6.3 TRABAJO A FUTURO

El modelo matemático de nuestro problema y resuelto con el método de ramificación y acotamiento que para las instancias de prueba se resolvieron en un tiempo razonable de manera óptima. Sin embargo, para instancias mayores el tiempo de ejecución puede ser extremadamente grande y es importante entonces disponer de metodologías que ayuden a disminuir los tiempo de ejecución. Como trabajo futuro se puede probar para instancias mayores a 11,000 puntos de demanda y analizar los tiempo de ejecución si estos fuesen altos, se pueden desarrollar heurísticas para encontrar soluciones factibles en tiempo razonable.

Proponer esta herramienta a los organismos encargados de incendios y recursos forestales para la ayuda de la toma de desiciones en la ubicación de recursos.

# BIBLIOGRAFÍA

---

- [1] F. A. Albini, H. E. Anderson, P. L. Andrews, and R. C. Rothermel. Estimating wildfire behavior and effects. Reporte Técnico 30, US Department of Agriculture, Washington, EUA, 1976.
- [2] M. F. Álvarez Taboada. *Aplicaciones de los sistemas de información geográfica para la ingeniería agroforestal*. Universidad de León, León, España, 2009.
- [3] T. M. Barrett and J. K. Gilless. Even-aged restrictions with sub-graph adjacency. *Annals of Operations Research*, 95(1–4):159–175, 2000.
- [4] J. E. Beasley and K. Jornsten. Enhancing an algorithm for set covering problems. *European Journal of Operational Research*, 58(2):293–300, 1992.
- [5] J. K. Brown. Introduction and fire regimes. In J. K. Brown and J. K. Smith, editors, *Wildland Fire in Ecosystems: Effects on Fire on Flora*, chapter 1, pages 1–8. US Department of Agriculture, Fort Collins, EUA, 2000.
- [6] R. Church and C. ReVelle. The maximal covering location model. *Papers of the Regional Science Association*, 32(1):101–118, 1974.
- [7] R. L. Church, A. T. Murray, and K. H. Barber. Forest planning at the tactical level. *Annals of Operations Research*, 95(1–4):3–18, 2000.
- [8] M. G. Cruz, M. E. Alexander, and R.H. Wakimoto. Assessing the probability of crown fire initiation based on fire danger indices. *Forestry Chronicle*, 79(5):976–983, 2003.

- 
- [9] M. G. Cruz, M. E. Alexander, and R.H. Wakimoto. Modeling the likelihood of crown fire occurrence in conifer forest stands. *Forest Science*, 50(5):640–658, 2004.
- [10] A. P Dimitrakopoulos and P. N. Omi. Evaluation of the fire simulation processes of the national fire management systems initial attack analysis processor. *Environmental Management*, 31(1):147–156, 2003.
- [11] M. Dimopoulou and I. Giannikos. Spatial optimization of resources deployment for forest-fire management. *International Transactions in Operational Research*, 8(3):523–534, 2001.
- [12] G. H. Donovan and D. B. Rideout. An integer programming model to optimize resource allocation for wildfire containment. *Forest Science*, 49(2):331–335, 2003.
- [13] M. Dimopoulou e I. Giannikos. Towards an integrated framework for forest fire control. *European Journal of Operational Research*, 152(2):476–486, 2004.
- [14] L. T. Egging and R. J. Barney. fire management: a component of land management planning. *Environmental management*, 3(1):15–24, 2008.
- [15] R. Epstein, E. Nieto, A. Weintraub, and J. Gabarro. A system for the design of short term harvesting strategy. *European Journal of Operational Research*, 119(2):427–439, 1999.
- [16] M. Fischetti, A. Caprara, and P. Toth. Algorithms for the set covering problem. *Annals of Operations Research*, 98(1–4):353–371, 2000.
- [17] Comisión Nacional Forestal. *Incendios forestales: Guía práctica para comunicadores*. Comisión Nacional Forestal, Zapopan, 2005.
- [18] Comisión Nacional Forestal. Reporte semanal de resultados de incendios forestales 2009: Datos acumulados del 01 de enero al 10 de diciembre de 2009. Technical report, SEMARNAT, 2010. Disponible en <http://www.conafor.gob.mx>.

- 
- [19] J. K. Gorte and R. W. Gorte. Application of economic techniques to fire management. Technical Report 7, US Department of Agriculture, Washington, EUA, Junio 1979.
- [20] L. V. Green and P. J. Kolesar. Improving emergency responsiveness with management science. *Management Science*, 50(8):1001–1014, 2004.
- [21] R. G. Haight and J. Fried. Deploying wildland fire suppression resources with a scenario-based standard response model. *INFOR*, 45(1):31–39, 2007.
- [22] J. Hardesty, L. Myers, and W. Fulks. Fire, ecosystems, and people: A preliminary assessment of fire as a global conservation issue. *The George Wright Forum*, 22(3):78–87, 2005.
- [23] J. M. Heineke and S. Weissenberger. An analysis of wildfire prevention. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 4(6):513–522, 1994.
- [24] L. H. Hernández, A. S. Buenrostro, and R. A. Mora. Simulación con cadenas de Markov para determinar el cambio de uso de suelo en México para el caso de bosques. In J. C. Leyva López, editor, *Actas de la XIV Escuela Latinoamericana de Verano de Investigación Operativa (ELAVIO'09)*, El Fuerte, México, Agosto 2009.
- [25] F. S. Hillier and G. J. Lieberman. *Introducción a la investigación de operaciones*. McGraw-Hill, México, D.f, 1997.
- [26] C. N. Hjortso. Enhancing public participation in natural resource management using soft OR – An application of strategic option development and analysis in tactical forest planning. *European Journal of Operational Research*, 152(2):667–683, 2004.
- [27] L. G. Honrby. Fire control planning in the northern rocky mountain region. Reporte Técnico 1, US Department of Agriculture, Washington, EUA, 1936.
- [28] ILOG. *ILOG CPLEX 11.0 User's Manual*. Mountain View, EUA, 2007.

- 
- [29] R. Jiménez and I. Cruz. Detección de incendios. *Biodiversitas*, 14(2):11–12, 2008.
- [30] O. Kariv and S. L. Hakimi. An algorithmic approach to network location problems i: The  $p$ -centers. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 37(3):513–538, 1979.
- [31] O. Kariv and S. L. Hakimi. An algorithmic approach to network location problems ii: The  $p$ -medians. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 37(3):529–569, 1979.
- [32] S. L. King. Sequential gaussian simulation vs. simulated annealing for locating pockets of high-value commercial trees in pennsylvania. *Annals of Operations Research*, 95(1–4):177–203, 2000.
- [33] P. H. Kourtz and B. Todd. Predicting the daily occurrence of lightning-caused forest fires. *Elsevier*, 164(1):1–20, 2003.
- [34] N. B. Kurbatskii and P. A. Tsvetkov. Integrated optimization in forest fire control management. *Canadian Journal of Forest Research*, 9(2):66–70, 1978.
- [35] C. M. Liu. Primal-dual methods for sustainable harvest scheduling problems. *Computers and Operations Research*, 119(8):733–749, 2001.
- [36] I. T Loane and J. S. Gould. *Aerial Suppression of Bushfires*. National Bushfire Research Unit, Camberra, Australia, 1986.
- [37] P. Lohmander. Optimal sequential forestry decisions under risk. *Annals of Operations Research*, 95(1–4):217–228, 2004.
- [38] D. L. Martell. *Operational Research and Forest Fire Management Resource Deployment*. Pergamon Press, Ontario, Canadá, 1990.
- [39] D. L Martell, E. Gunn, and A. Weintraub. Forest management challenges for operational researchers. *European Journal of Operational Research*, 104(1):1–17, 1998.

- 
- [40] E. Martínez-Falero and S. González-Alonso. *Quantitative Techniques in Landscape Planning*. CRC, Boca Raton, EUA, 1995.
- [41] R. L. Myers. Convivir con el fuego. Reporte técnico, The Nature Conservancy, Tallahassee, EUA., 2006.
- [42] S.J. Pyne. *World Fire: The Culture of Fire on Earth*. University of Washington Press, Washington, EUA, 1997.
- [43] R.C. Rothermel. How to predict the spread and intensity of forest and range fires. Reporte Técnico 143, US Department of Agriculture, Washington, EUA, Noviembre 2010.
- [44] P. R. Vasconcelos and A. Ruiz. Modeling the spatial variability of forest fuel arrays. *Forest Science*, 44(2):201–205, 2001.
- [45] R. Vélez. *La defensa contra incendios forestales*. McGraw Hill, Madrid, España, 2003.
- [46] Ricardo Vélez. *La defensa contra incendios forestales, fundamentos y experiencias*. McGraw-Hill, Madrid, España, 2000.
- [47] A. Weintraub, R. L. Church, A. T. Murray, and M. Guignard. Forest management models and combinatorial algorithms: Analysis of state of the art. *Annals of Operations Research*, 96(1–4):271–285, 2000.

## APÉNDICE A

# MODELOS DE COMBUSTIBLE

---

### A.1 MODELOS ROTHERMEL

En Estados Unidos, donde el tema de la defensa contra incendios forestales lleva recibiendo atención desde principio del siglo XX, se menciona el plan de protección contra los bosques de California [43], redactado por Dubois en 1914 y basado en tres tipos de cobertura: pautizal, matorral y bosque.

En los años treinta aparece el concepto “tipo de combustible”. Honrby (1936)[27] hace una clasificación de los modelos de combustibles basada en la velocidad de propagación del fuego y en la resistencia al control, considerando los valores bajo, medio y alto, apoyándose en los incendios y en las estimaciones de los expertos. En los años setenta, se dan a conocer modelos de combustible en dos versiones, el Sistema Nacional de Peligro de Incendio (NFDRS) y el del Laboratorio de Incendios Forestales (NFFL), desarrollado por Rothermel, Anderson, Albini, Andrews y otros [1]. Este último sistema es el que se ha extendido más ampliamente, llegando a Europa a mediados de los ochenta y sirviendo de base para numerosos proyectos en todo el mundo.

La versión simplificada de los trece modelos de Rothermel que se elaboraron para regiones forestales, se encuentran en la Tabla A.1, en donde la primera columna muestra al grupo que pertenece, la segunda columna indica en número de modelo de combustible(NM) que se le ha asignado y por último la descripción del mismo.

Tabla A.1: Clasificación de los modelos de combustible

| Grupo    | NM | Descripción  |
|----------|----|--|
| Pastos   | 1  | Pasto fino, seco y bajo que recubre totalmente el suelo. Pueden aparecer algunas plantas leñosas dispersas ocupando menos de un tercio de la superficie. La cantidad de combustible (materia seca) es de 1-2 T/ha.   |
|          | 2  | Pasto fino, seco y bajo que recubre totalmente el suelo. Las plantas leñosas cubren de un tercio a dos tercios de la superficie. La cantidad de combustible (materia seca) es de 5-10 T/ha.  |
|          | 3  | Pasto grueso, denso, seco y alto con posible presencia de algunas plantas leñosas dispersas. La cantidad de combustible (materia seca) es de 4-6 T/ha. Los fuegos son los de mayor intensidad dentro del grupo de pastos, dando así mismo lugar a unas elevadas velocidades de propagación bajo la influencia del viento, pudiendo llevar al incendio por la parte superior de la hierba y cruzar zonas de agua encharcada. Campos de cereales no cosechados, paraderas naturales altas y herbazales de sitios encharcados son ejemplos de dicho modelo. |
| Matorral | 4  | Matorral o plantación joven muy densa, de más de 2 m de altura con ramas muertas en su interior. La cantidad de combustible es de 25-35 T/ha. Nos podemos encontrar ante fuegos rápidos que se propagan por las copas consumiendo follaje y material leñoso fino, vivo y muerto.   |

---

|         |   |  |
|---------|---|--|
|         | 5 | Matorral denso y verde de menos de 1 m de altura. La cantidad de combustible es de 5-8 T/ha. El incendio tendrá lugar por los combustibles superficiales (hojarasca esparcida por el matorral, pasto y otras herbáceas del sotobosque) encontrándonos ante fuegos no muy intensos ya que las cargas son ligeras.   |
|         | 6 | Parecido al 5 pero con presencia de especies más inflamables o con restos de corta y plantas de mayor talla. La cantidad de combustible es de 10-15 T/ha.  |
|         | 7 | Formado por matorral de especies muy inflamables de 0.5 a 2 metros de altura situado como sotobosque de coníferas. La cantidad de combustible es de 10-15 T/ha. Áreas arboladas de pino con sotobosque de palmáceas o cistáceas son ejemplos de este modelo.   |
| Bosques | 8 | Bosque denso, sin matorral. La cantidad de combustible es de 10-12 T/ha. La propagación del fuego tiene lugar por la hojarasca muy compacta. Los fuegos superficiales presentan pequeñas alturas de llama, aunque si encuentra acumulaciones de combustibles pesados pueden dar llamaradas. Hojarasca como los de hayas son ejemplos de este modelo.                         |
|         | 9 | Parecido al modelo 8 pero con la hojarasca menos compacta formada por acículas largas y rígidas o follaje de hojas grandes. La cantidad de combustible es de 7-9 T/ha. Los incendios son superficiales, aunque más rápidos y de una mayor longitud de llama. Bosques cerrados de pinos de hoja larga como los de <i>Pinus pinaster</i> , son representativos de este modelo. |

---

---

|  |    |   |
|--|----|---|
|  | 10 | Bosques con una gran cantidad de leña y de árboles caídos debido a vendavales, plagas o enfermedades. La cantidad de combustible es de 30-35 T/ha. Los fuegos se desarrollan quemando los combustibles superficiales con una mayor intensidad que en los otros. Material leñoso caído y desechos antiguos de raleos ligeros o cortas parciales son ejemplos de este modelo. |
| Restos de corta y operaciones selvícolas | 11 | Bosque claro o fuertemente aclarado, con restos de poda o aclarado dispersos y con presencia de plantas herbáceas rebrotando. La cantidad de combustible es de 25-30 T/ha. El fuego es bastante activo en los desechos y materiales herbáceos mezclados con los residuos.   |
|  | 12 | Predominio de los restos de corta sobre el arbolado, encontrando los restos de poda o aclareo cubriendo todo el suelo. La cantidad de combustible es de 50-80 T/ha. Los fuegos se propagan rápidamente con unas intensidades muy altas que son capaces de generar pavesas.  |
|  | 13 | Grandes acumulaciones de restos gruesos y pesados, cubriendo todo el suelo. La cantidad de combustible es de 100-150 T/ha. El incendio corre a través del área por una capa continua de desechos.   |

---

## A.2 MODELOS DE ESTUDIO

Como ya se conoce la modelización de la combustibilidad forestal está representada por cuatro grandes grupos de combustible: pastos, matorral, hojarasca bajo arbolado y restos de corta de labores selvícolas. Ahora nos surge la necesidad de la incorporación de modelos comprendidos en situaciones intermedias o híbridas de los

ya existentes para nuestro estudio.

Los modelos híbridos para el estado de Chiapas, México se representan en la siguiente Tabla A.2, los cuales fueron modelados en base a las observaciones de la vegetación y relacionándolos con los modelos Rothermel. Estos nuevos modelos es una aportación que hace este trabajo.

Tabla A.2: Modelos de combustible del estado de Chiapas

| Vegetación           | N° Modelo | Modelo Rothermel             |
|----------------------|-----------|------------------------------|
| Selva caducifolia    | c1        | 6 (30 %), 9 (10 %), 11(60 %) |
| Bosque encino        | c2        | 4 (100 %)                    |
| Bosque coníferas     | c3        | 7 (100 %)                    |
| Selva subcaducifolia | c4        | 5 (15 %), 8 (15 %), 11(70 %) |
| Selva perennifolia   | c5        | 4 (25 %), 7 (35 %), 11(40 %) |
| Bosque de montaña    | c6        | 11 (100 %)                   |

La Tabla A.2 muestra la relación entre los modelos de combustible Rothermel y la vegetación en el estado de Chiapas. En la primera columna muestra el tipo de vegetación existente en el estado, en la segunda columna el nombre dado a cada uno de los combustibles y finalmente el porcentaje de cada modelo de Rothermel asociado con cada tipo de vegetación para el caso estudio.

APÉNDICE B

# ÍNDICE DE PELIGRO POTENCIAL DE INCENDIOS

---

## B.1 FORMULACIÓN ÍNDICE DE PELIGRO

### B.1.1 DETERMINACIÓN DEL SUBÍNDICE DE IGNICIÓN

El subíndice de ignición se determina mediante la ecuación (B.1).

$$I_{ig} = PImi * CImi * Si/Stc \quad (B.1)$$

La probabilidad de ignición se determina mediante el sistema tabular elaborado por el USDA Forest Service (ver Tabla B.1), adaptado por el Área de defensa contra los incendios forestales y medio ambiente, en el que mediante el conocimiento de la humedad del combustible fino muerto, la temperatura y el porcentaje de sombreado en el que se encuentran los combustibles, se determina la correspondiente probabilidad de ignición, expresada en términos porcentuales.

Para la evaluación de la humedad del combustible fino o muerto se puede emplear el procedimiento tabular, que en función de las condiciones de temperatura y humedad ambiente proporciona la humedad básica del combustible fino muerto. A la humedad calculada con el procedimiento tabular se le aplica un sumando corrector

Tabla B.1: Probabilidad de ignición (Estimación de la probabilidad de que una brasa, al caer sobre el combustible pueda inflamarlos)

|               |             | Probabilidad de ignición                  |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|---------------|-------------|---|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Sombreado (%) | Temperatura | Humedad del combustible ligero muerto (%) |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|               |             | 2   | 3   | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 |
| 0-10          | 40+         | 100                                       | 100 | 90 | 80 | 70 | 60 | 50 | 40 | 40 | 30 | 30 | 30 | 20 | 20 | 20 | 10 |
|               | 35-40       | 100                                       | 100 | 90 | 80 | 70 | 60 | 50 | 40 | 40 | 30 | 30 | 30 | 20 | 20 | 20 | 10 |
|               | 30-35       | 100                                       | 90  | 80 | 70 | 60 | 60 | 50 | 40 | 40 | 30 | 30 | 30 | 20 | 20 | 10 | 10 |
|               | 25-30       | 100                                       | 90  | 80 | 70 | 60 | 50 | 50 | 40 | 30 | 30 | 30 | 20 | 20 | 20 | 10 | 10 |
|               | 20-25       | 100                                       | 90  | 80 | 70 | 60 | 50 | 40 | 40 | 30 | 30 | 20 | 20 | 20 | 20 | 10 | 10 |
|               | 15-20       | 90  | 80  | 70 | 60 | 50 | 50 | 40 | 30 | 30 | 30 | 20 | 20 | 20 | 10 | 10 | 10 |
|               | 10-15       | 90  | 80  | 70 | 60 | 50 | 40 | 40 | 30 | 30 | 20 | 20 | 20 | 10 | 10 | 10 | 10 |
|               | 5-10        | 90  | 80  | 70 | 60 | 50 | 40 | 40 | 30 | 30 | 20 | 20 | 20 | 10 | 10 | 10 | 10 |
|               | 0-5         | 90  | 70  | 60 | 60 | 50 | 40 | 40 | 30 | 30 | 20 | 20 | 20 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| 10-50         | 40+         | 100                                       | 100 | 80 | 70 | 60 | 50 | 50 | 40 | 40 | 30 | 30 | 20 | 20 | 20 | 20 | 10 |
|               | 35-40       | 100                                       | 90  | 80 | 70 | 60 | 50 | 50 | 40 | 40 | 30 | 30 | 20 | 20 | 20 | 10 | 10 |
|               | 30-35       | 100                                       | 90  | 80 | 70 | 60 | 50 | 40 | 40 | 30 | 30 | 30 | 20 | 20 | 20 | 10 | 10 |
|               | 25-30       | 100                                       | 90  | 80 | 70 | 60 | 50 | 40 | 40 | 30 | 30 | 20 | 20 | 20 | 10 | 10 | 10 |
|               | 20-25       | 100                                       | 80  | 70 | 60 | 50 | 50 | 40 | 40 | 30 | 30 | 20 | 20 | 20 | 10 | 10 | 10 |
|               | 15-20       | 90  | 80  | 70 | 60 | 50 | 50 | 30 | 30 | 20 | 30 | 20 | 20 | 20 | 10 | 10 | 10 |
|               | 10-15       | 90  | 60  | 70 | 60 | 50 | 40 | 40 | 30 | 30 | 20 | 20 | 20 | 10 | 10 | 10 | 10 |
|               | 5-10        | 90  | 60  | 70 | 60 | 50 | 40 | 40 | 30 | 30 | 20 | 20 | 20 | 10 | 10 | 10 | 10 |
|               | 0-5         | 80  | 70  | 60 | 50 | 50 | 40 | 30 | 30 | 20 | 20 | 20 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| 50-90         | 40+         | 100                                       | 90  | 80 | 70 | 60 | 50 | 50 | 40 | 40 | 30 | 30 | 20 | 20 | 20 | 10 | 10 |
|               | 35-40       | 100                                       | 90  | 80 | 70 | 60 | 50 | 50 | 40 | 30 | 30 | 30 | 20 | 20 | 20 | 10 | 10 |
|               | 30-35       | 100                                       | 90  | 80 | 70 | 60 | 50 | 40 | 40 | 30 | 30 | 20 | 20 | 20 | 10 | 10 | 10 |
|               | 25-30       | 100                                       | 80  | 70 | 60 | 60 | 50 | 40 | 40 | 30 | 30 | 20 | 20 | 20 | 10 | 10 | 10 |
|               | 20-25       | 90  | 80  | 70 | 60 | 50 | 50 | 40 | 30 | 30 | 30 | 20 | 20 | 10 | 10 | 10 | 10 |
|               | 15-20       | 90  | 80  | 70 | 60 | 50 | 40 | 40 | 30 | 30 | 20 | 20 | 20 | 10 | 10 | 10 | 10 |
|               | 10-15       | 90  | 80  | 70 | 60 | 50 | 40 | 40 | 30 | 30 | 20 | 20 | 20 | 10 | 10 | 10 | 10 |
|               | 5-10        | 90  | 70  | 60 | 50 | 50 | 40 | 30 | 30 | 30 | 20 | 20 | 20 | 10 | 10 | 10 | 10 |
|               | 0-5         | 80  | 70  | 60 | 50 | 50 | 40 | 30 | 30 | 20 | 20 | 20 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| 90-100        | 40+         | 100                                       | 90  | 80 | 70 | 60 | 50 | 50 | 40 | 30 | 30 | 30 | 20 | 20 | 20 | 10 | 10 |
|               | 35-40       | 100                                       | 90  | 80 | 70 | 60 | 50 | 40 | 40 | 30 | 30 | 20 | 20 | 20 | 20 | 10 | 10 |
|               | 30-35       | 100                                       | 80  | 70 | 60 | 60 | 50 | 40 | 40 | 30 | 30 | 20 | 20 | 20 | 10 | 10 | 10 |
|               | 25-30       | 90  | 80  | 70 | 60 | 50 | 50 | 40 | 30 | 30 | 30 | 20 | 20 | 20 | 10 | 10 | 10 |
|               | 20-25       | 90  | 80  | 70 | 60 | 50 | 40 | 40 | 30 | 30 | 20 | 20 | 20 | 10 | 10 | 10 | 10 |
|               | 15-20       | 90  | 80  | 70 | 60 | 50 | 40 | 40 | 30 | 30 | 20 | 20 | 20 | 10 | 10 | 10 | 10 |
|               | 10-15       | 90  | 70  | 60 | 60 | 50 | 40 | 40 | 30 | 30 | 20 | 20 | 20 | 10 | 10 | 10 | 10 |
|               | 5-10        | 80  | 70  | 60 | 50 | 50 | 40 | 30 | 30 | 20 | 20 | 20 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
|               | 0-5         | 80  | 70  | 60 | 50 | 40 | 40 | 30 | 30 | 20 | 20 | 20 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |

Tabla B.2: Humedad relativa del combustible

| Temperatura | Humedad relativa (porcentaje) |     |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |     |
|-------------|-------------------------------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|
|             | 0-4                           | 5-9 | 10-14 | 15-19 | 20-24 | 25-29 | 30-34 | 35-39 | 40-44 | 45-49 | 50-54 | 55-59 | 60-64 | 65-69 | 70-74 | 75-79 | 80-84 | 85-89 | 90-94 | 95-99 | 100 |
| 0-9         | 1                             | 2   | 2     | 3     | 4     | 5     | 5     | 6     | 7     | 7     | 7     | 8     | 9     | 9     | 10    | 10    | 11    | 12    | 13    | 13    | 13  |
| 10-20       | 1                             | 2   | 2     | 3     | 4     | 5     | 5     | 6     | 6     | 7     | 7     | 8     | 8     | 9     | 9     | 10    | 11    | 12    | 12    | 12    | 13  |
| 21-31       | 1                             | 1   | 2     | 2     | 3     | 4     | 5     | 5     | 6     | 7     | 7     | 8     | 8     | 8     | 9     | 10    | 10    | 11    | 12    | 12    | 13  |
| 32-42       | 1                             | 1   | 2     | 2     | 3     | 4     | 4     | 5     | 6     | 7     | 7     | 8     | 8     | 8     | 9     | 10    | 10    | 11    | 12    | 12    | 13  |
| 43 o más    | 1                             | 1   | 2     | 2     | 3     | 4     | 4     | 5     | 6     | 7     | 7     | 8     | 8     | 8     | 9     | 10    | 10    | 11    | 12    | 12    | 12  |

para incluir factores que intervienen en su valor como son: el sombreado pendiente, exposición, hora del día y época del año.

Para nuestro estudio calculamos la humedad de combustible por medio del sistema tabular elaborado por el USDA Forest Service. Como sabemos los datos de entrada son temperatura y humedad en el ambiente los cuales nos permiten conocer la humedad por medio de la Tabla B.2.

Como se mencionó anteriormente a la humedad del combustible se le aplica un sumando corrector para incluir los efectos de pendiente, el sombreado del combustible, la hora y época del año. La Tabla B.1.1 sirve para saber cual es el corrector a la humedad tomada de la Tabla B.2. En esta tabla la primera columna muestra la dirección de exposición del sol sobre la vegetación, es decir si el sol la ilumina desde el norte (N), sur (S), este (E) y oeste (O). En la segunda columna se indica la pendiente en la que se ubica la vegetación y por último la hora de estudio. Dependiendo de la hora, exposición y pendiente es el sumando que se aplica. Existen tablas para los diferentes meses la que se muestra aquí es para los meses de mayo, junio y julio.

La Tabla B.1.1 tiene los mismos parámetros que la Tabla B.1.1 la diferencia consta que aquí no importa la pendiente de exposición al sol el factor corrector es el mismo para todas las pendientes. La razón por la que no existe un factor corrector se debe a que la vegetación esta sombreada al más del 50%, por tanto lo poco que es iluminado por el sol no influye.

Los valores para los coeficientes de ignición característicos de cada uno de

Tabla B.3: Factor de corrección de humedad del combustible (meses mayo - junio - julio)

| Exposición | hora<br>pendiente | Menos del 50 % de vegetación en sombra |       |       |       |       |       |
|------------|-------------------|--|-------|-------|-------|-------|-------|
|            |                   | 8:00                                   | 10:00 | 12:00 | 14:00 | 16:00 | 18:00 |
| N          | 5-30 %            | 3                                      | 1     | 0     | 0     | 1     | 3     |
|            | + 30 %            | 4                                      | 2     | 1     | 1     | 2     | 4     |
| E          | 5-30 %            | 2                                      | 1     | 0     | 0     | 1     | 4     |
|            | + 30 %            | 2                                      | 0     | 0     | 1     | 3     | 5     |
| S          | 5-30 %            | 3                                      | 1     | 0     | 0     | 1     | 3     |
|            | + 30 %            | 3                                      | 1     | 1     | 1     | 1     | 3     |
| O          | 5-30 %            | 3                                      | 1     | 0     | 0     | 1     | 3     |
|            | + 30 %            | 5                                      | 3     | 1     | 0     | 0     | 2     |

Tabla B.4: Factor de corrección de humedad del combustible (meses mayo - junio - julio)

| Exposición | hora<br>pendiente | Más del 50 % de vegetación en sombra |       |       |       |       |       |
|------------|-------------------|--------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|            |                   | 8:00                                 | 10:00 | 12:00 | 14:00 | 16:00 | 18:00 |
| N          | más de 0 %        | 5                                    | 4     | 3     | 3     | 4     | 5     |
| E          | más de 0 %        | 4                                    | 4     | 3     | 4     | 4     | 5     |
| S          | más de 0 %        | 4                                    | 4     | 3     | 3     | 4     | 5     |
| O          | más de 0 %        | 5                                    | 4     | 3     | 3     | 4     | 4     |

los modelos de combustibles han sido determinados mediante observación directa en incendios forestales y comprobaciones individualizadas en quemas por puntos en cada uno de los modelos de combustibles. Se han considerado los valores finales expresados como valor máximo uno, tomando como referencia de la unidad el coeficiente de ignición del modelo de combustible número uno, de tal forma que la obtención de los valores de los coeficientes de ignición restantes se han obtenido por referencia a los resultados para el modelo 1 del sistema de Rothermel (Tabla B.5).

| Modelo de combustible | Cig |
|-----------------------|-----|
| Modelo 1              | 1   |
| Modelo 2              | 1   |
| Modelo 3              | 0.9 |
| Modelo 4              | 0.6 |
| Modelo 5              | 0.2 |
| Modelo 6              | 0.6 |
| Modelo 7              | 0.7 |
| Modelo 8              | 0.5 |
| Modelo 9              | 0.4 |
| Modelo 10             | 0.2 |
| Modelo 11             | 0.2 |
| Modelo 12             | 0.1 |
| Modelo 13             | 0.1 |

Tabla B.5: Valores de coeficiente de ignición característico de cada uno de los tipos de modelos de combustible Rothermel

Ahora bien, como se recuerda (Tabla A.2) algunos de los modelos de combustible para el estado de Chiapas son mezcla de los 13 modelos de Rothermel. Por tanto, los coeficientes de ignición también se calculan en base a esta proposición. En la Tabla B.6 se muestran los valores calculados para los coeficientes de ignición para los modelos de combustibles de Chiapas.

Tabla B.6: Coeficiente de ignición de los modelos de combustible de Chiapas.

| Vegetación           | Num. Modelo | Modelo Rothermel            | Cig   |
|----------------------|-------------|-----------------------------|-------|
| Selva caducifolia    | c1          | 6(30 %), 9 (10 %), 11(60 %) | 0.340 |
| Bosque encino        | c2          | 4 (100 %)                   | 0.600 |
| Bosque coníferas     | c3          | 7(100 %)                    | 0.700 |
| Selva subcaducifolia | c4          | 5(15 %), 8 (15 %), 11(70 %) | 0.245 |
| Selva perennifolia   | c5          | 4(25 %), 7 (35 %), 11(40 %) | 0.475 |
| Bosque de montaña    | c6          | 11(100 %)                   | 0.200 |

### B.1.2 DETERMINACIÓN DEL SUBÍNDICE DE COMPORTAMIENTO DINÁMICO

La expresión correspondiente al subíndice de comportamiento dinámico (B.2) recoge la facilidad aportada por cada uno de los modelos de combustible presentes para dar continuidad a los procesos de ignición, a través de las concatenaciones de las reacciones de oxidación que materializan la combustión. Para ello se ha incluido en la expresión un valor numérico o peso dependiente de la velocidad de propagación, determinada mediante las ecuaciones del sistema BEHAVE, en función de las características aportadas por el viento y porcentaje de pendiente.

$$Icd = (CDmi)(Si/Stc) \quad (B.2)$$

Para obtener la velocidad del viento a media llama, se multiplica la velocidad del viento por un índice corrector dependiente del modelo de combustible.

Tanto la velocidad de propagación, como la longitud de llama se obtienen por medio de las tablas creadas por el USDA Forest Service.

| Velocidad propagacion (m/min) | Peso |
|-------------------------------|------|
| 0-10                          | 1    |
| 11-20                         | 2    |
| 21-30                         | 3    |
| 31-40                         | 4    |
| 41-50                         | 5    |
| 51-60                         | 6    |
| 61-70                         | 7    |
| 71-80                         | 8    |
| 81-90                         | 9    |
| $\geq 91$                     | 10   |

Tabla B.7: Asignación de pesos para la determinación del comportamiento dinámico en función de la velocidad de propagación

### B.1.3 DETERMINACIÓN DEL SUBÍNDICE DE COMPORTAMIENTO ENERGÉTICO

La expresión correspondiente al subíndice de comportamiento energético (B.3) se incluyen los pesos correspondientes a los valores de salida de la ecuación (sistema BEHAVE), calculada mediante la asignación de los parámetros meteorológicos determinados para cada combustible (Tabla B.8). Donde  $V_p$  es la velocidad de propagación,  $A$  altura de la llama.

$$I_{ce} = V_p + A + I \quad (\text{B.3})$$

La Tabla B.8 de pesos es válida para cada uno de los parámetros de comportamiento del fuego obtenidos. Así para un valor determinado, por ejemplo, el correspondiente a la longitud de llama, una vez localizado el intervalo en el que este se encuentra, se busca según la misma fila el valor del peso asignado. Este proceso

es individual para cada uno de los parámetros. Por ejemplo si la velocidad de propagación es de 23 m/min entonces el peso que se le asignará es 3 y el peso para altura de la llama ( $A$ ) si esta es de 1.58 m será de 4, por lo tanto el valor de  $I_{ce}$  para este caso es 7.

Tabla B.8: Asignación de pesos para la determinación del subíndice de comportamiento energético

| Velocidad propagación (m/min) | Altura de la llama(m) | Peso |
|-------------------------------|-----------------------|------|
| m/min                         | m                     |      |
| 0-10                          | 0-0.5                 | 1    |
| 11-20                         | 0.51-1                | 2    |
| 21-30                         | 1.1-1.5               | 3    |
| 31-40                         | 1.51-2.0              | 4    |
| 41-50                         | 2.1-2.5               | 5    |
| 51-60                         | 2.51-3                | 6    |
| 61-70                         | 3.1-3.5               | 7    |
| 71-80                         | 3.51-4                | 8    |
| 81-90                         | 4.1-4.5               | 9    |
| $\geq 91$                     | $\geq 4.6$            | 10   |

## B.2 FORMULACIÓN ÍNDICE DE DIFICULTAD DE EXTINCIÓN

Este índice se construye mediante el empleo de forma integrada de alguno de los índices anteriormente indicados ( $I_{ce}$ ) y con la incorporación de la información relativa a las tasas de rendimientos en apertura de líneas de defensa, mediante equipos de especialistas de extinción, corregidas estas según los porcentajes de pendientes promedio existentes de los diferentes modelos de combustible presentes en las zona de análisis. Este índice se ve representado por la ecuación (B.4), donde  $I_{ce}$  es el índice de comportamiento energético explicado anteriormente. El índice de movili-

dad ( $I_{mi}$ ) y líneas de apertura de defensa ( $I_{ald}$ ) los cuales se explican a continuación.

$$I_{dex} = I_{ce} / (I_{mi} + I_{ald}) \quad (\text{B.4})$$

### Índice de movilidad ( $I_{mi}$ )

El índice de movilidad se refiere a la mayor o menor facilidad que ofrece el área forestal al tránsito de los recursos de extinción. En cierta medida hay que entender que salvo en circunstancias en las que la vegetación lo permita. La movilidad se refiere a la capacidad de accesos que ofrece el área forestal a través de la red de infraestructuras lineales existentes. La ecuación (B.5) representa el índice de movilidad.

$$I_m = l_i * S_i / S_{tc} \quad (\text{B.5})$$

donde  $l_i :=$  Representa el peso asignado en función de la longitud en metros de las infraestructuras de carretera en la mancha del modelo. Para realizar la determinación de los pesos se utiliza la Tabla B.9.

$S_i :=$  Superficie que ocupa el modelo de combustible  $i$  en km.

$S_{tc} :=$  Superficie Total en km.

La Tabla B.9 muestra en la primera columna la longitud de la carretera en kilómetros y en la segunda columna el peso asignado según la longitud, es decir si se tiene una longitud de carretera de 220 km el peso que se le asinga es de  $l_i = 3$ .

### Tasa de rendimiento $Trh$ y coeficiente de ajuste $Cp$

La Tabla B.10 representa el peso asignado a la tasa de rendimiento en la apertura de líneas de defensa según los modelos de combustible, mediante equipos de especialistas de extinción.

La Tabla B.11 Representa el coeficiente de ajuste según el tipo de pendiente existente en cada uno de las áreas que ocupan los modelos de combustible.

Tabla B.9: Asignación de pesos según longitud de carretera

| Longitud en de la carretera (km) | Peso asignado |
|----------------------------------|---------------|
| 0-100                            | 1             |
| 101-200                          | 2             |
| 201-300                          | 3             |
| 301-400                          | 4             |
| 401-500                          | 5             |
| 501-600                          | 6             |
| 601-700                          | 7             |
| 701-800                          | 8             |
| 801-900                          | 9             |
| $\geq 901$                       | 10            |

Tabla B.10: Asignación de pesos según rendimiento por persona en apertura de líneas de defensa con herramientas manuales m/hora.

| Rendimientos por persona(m/h) | Peso asignado |
|-------------------------------|---------------|
| $\leq 5$                      | 1             |
| 6-10                          | 2             |
| 11-15                         | 3             |
| 16-20                         | 4             |
| 21-25                         | 5             |
| 26-30                         | 6             |
| 31-35                         | 7             |
| 36-40                         | 8             |
| 41-45                         | 9             |
| $\geq 46$                     | 10            |

Tabla B.11: Ajuste según el tipo de pendiente.

| Intervalo de pendiente | Valores de cp |
|------------------------|---------------|
| 0-15 %                 | 1             |
| 16-30 %                | 0.8           |
| 31-45 %                | 0.6           |
| 45-60 %                | 0.5           |

## APÉNDICE C

# MANUAL DE USUARIO

---

### C.1 ÍNDICE DE PRIORIDAD DE DEFENSA

Este programa permite la estimación del índice de prioridad de defensa con respecto al índice de peligro potencial de incendios forestales, así como el índice de dificultad de extinción (basado en la formulación ha sido realizada por Francisco Rodríguez y Silva, Dr. Ingeniero de Montes. Departamento de Ingeniería Forestal. Universidad de Córdoba).

1.- Los datos pueden ser dinámicos o históricos, es decir, se puede elegir de los datos meteorológicos que se han tomado a través del tiempo o analizar con datos tomados en ese momento según la situación meteorológica.

2.- En el módulo (IPP) índice de peligro potencial de incendio se puede elegir el cálculo de todo el modelo de combustible o solo por una pendiente en específica, se selecciona y al dar click en el punto de interés devuelve el IPP del punto seleccionado y modifica el mapa para visualizar el peligro potencial de incendios.

3.- En el módulo de datos de combustible cambia según el modelo de selección tanto el sombreado, como la superficie que ocupa. Los tres módulos anteriores se muestran en la interfaz de la Figura C.2.

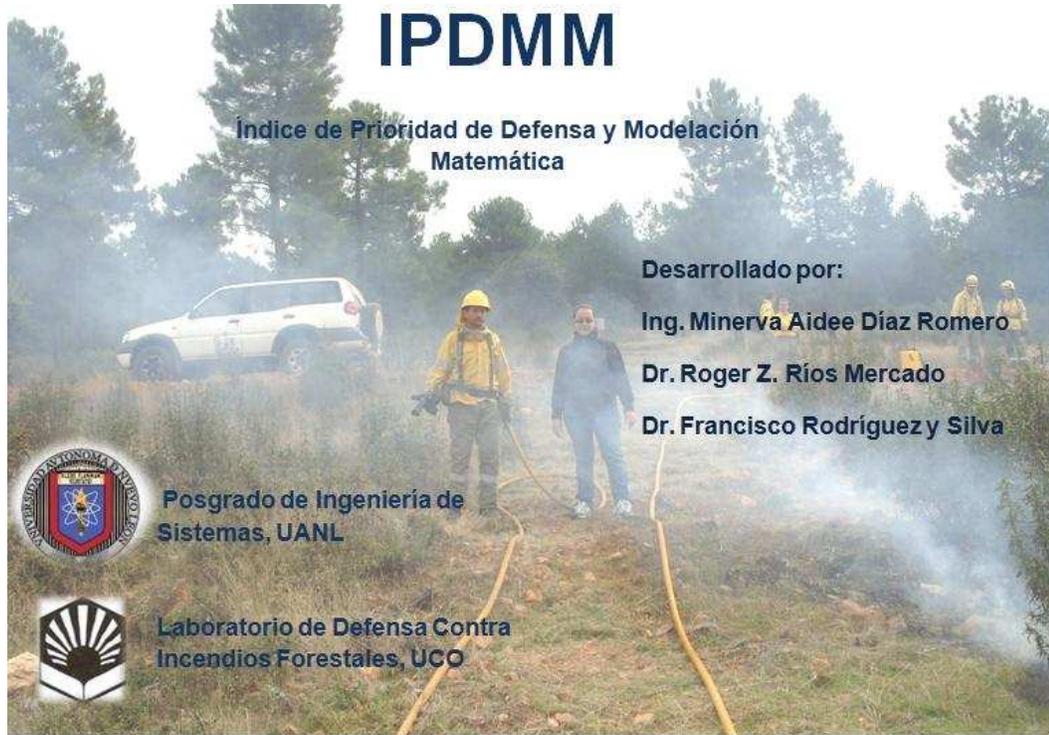


Figura C.1: Interfaz de pantalla de Inicio del programa



Figura C.2: Interfaz datos de entrada

4.- Datos meteorológicos, se selecciona el mes de estudio, es importante elegir el mes adecuado para obtener la humedad del combustible y la hora.

5. En el conjunto de datos dinámicos se puede variar la temperatura, humedad y la velocidad del viento, para poder simular con diferentes rangos de datos meteorológicos.

6. - Datos de salida, en este módulo se pueden visualizar los mapas de pen-

dientes, combustibles, y el mapa de índice de peligro. Aquí se calcula el índice de prioridad de defensa que se evalúa sumando el índice de dificultad de extinción y el índice de prioridad de defensa, tanto por pendientes como de combustible y se visualiza en el mapa. Los tres módulos anteriores se muestran en la interfaz de la Figura C.5.



Figura C.3: Interfaz datos de entrada y datos de salida

## C.2 REPORTES

En el apartado de reportes se pueden realizar tanto del ipp como ipd, y puede hacerse con respecto a la pendiente y modelos de combustibles(ver Figura C.4).



Figura C.4: Interfaz de la selección del reporte

En el cuadro de texto se puede observar los índices y se pueden comparar y ver en que rango se encuentran bajo, medio, alto o extremo.

## C.3 MODELACIÓN MATEMÁTICA

1. En el módulo 1 como entrada se escribe el número de kilómetros a lo largo de la superficie, el número de brigadas, como se muestra en la Figura C.5.



The screenshot shows a software interface with three main sections: 'Datos de Entrada' (Input Data), 'Generar Instancia' (Generate Instance), and 'Datos de salida' (Output Data). In the 'Datos de Entrada' section, there are two input fields: 'Total de superficie' with the value '390' and a unit selector 'km', and 'Número de brigadas' with the value '6'. The 'Generar Instancia' section contains two buttons: 'Zonas potenciales' and 'Generar Instancia'. The 'Datos de salida' section has a dropdown menu labeled 'Mapas' and a button labeled 'Mostrar Solución'.

Figura C.5: Interfaz del apartado de modelación matemática

2. Los botones se activan al abrir la imagen de estudio, el botón de zonas potenciales genera los puntos potenciales de ubicación de puntos de demanda, y posteriormente se genera la instancia en un archivo del cual nos pedirá el nombre.

3. En el módulo de salida se puede visualizar el mapa de carreteras y el las densidades de carreteras.

# FICHA AUTOBIOGRÁFICA

---

Minerva Aidee Díaz Romero

Candidato para el grado de Maestría en Ciencias en Ingeniería de Sistemas  
de la Universidad Autónoma de Nuevo León  
Universidad Autónoma de Nuevo León  
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Tesis:

UN MARCO INTEGRADO PARA EL CONTROL Y  
GESTIÓN DE INCENDIOS FORESTALES

Minerva Aidee Díaz Romero nació el 10 de julio de 1986, segunda hija del Sr Alfredo Díaz López y Minerva Romero Ligonio. Egresada de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla de (2004-2008), graduada con distinción *Ad Honorem* obteniendo el grado de Ingeniero en Ciencias de la Computación. Actualmente es estudiante del Posgrado en Ingeniería de Sistemas de la Universidad Autónoma de Nuevo León en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica en donde ha desarrollado este trabajo de tesis bajo la supervisión del Dr. Roger Z. Ríos Mercado. En Septiembre de 2010 realizó una estancia de intercambio académico en la Universidad de Córdoba, España en colaboración con el Dr. Francisco Rodríguez y Silva.