

UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA  
FACULDADE DE FÍSICA  
DEPARTAMENTO DE FÍSICA APLICADA  
GRUPO DE INVESTIGACIÓN TERBIPROMAT



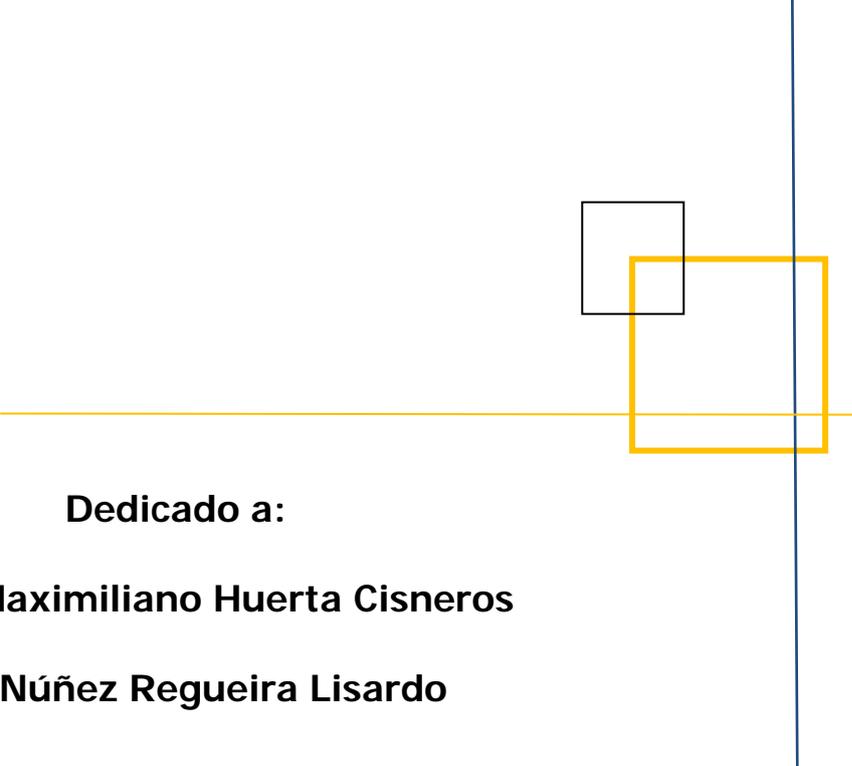
*Estudios de valoración energética de combustibles forestales para la  
prevención de incendios forestales en la Sierra de la Primavera  
(Jalisco, México) mediante calorimetría de combustión y ensayos de  
inflamabilidad*



Photo - John McColgan BLM Alaska Fire Service

**Memoria presentada por:**  
D. Antonio Rodríguez Rivas  
Para optar al Grado de Doctor por la USC

**Santiago de Compostela, a 3 de Septiembre de 2009**



**Dedicado a:**

**+ M. C. Maximiliano Huerta Cisneros**

**+ Dr. Núñez Regueira Lisardo**



**A MIS HIJAS,  
ANA KAREN, NETZI, CESIA  
POR TODA SU AMOR Y COMPRESIÓN**

**A MIS PADRES, ANTONIO, JOSEFINA, Y HERMANOS,  
OSCAR, ELOIN ELIZABETH,  
POR SU AYUDA Y AMOR**

**SARA,  
POR TU GRAN COLABORACIÓN INCONDICIONAL EN  
ESTE TRABAJO**

**A MIS AMIGOS, TEÓFILO, PABLO, JÉSUS, LUCIA,  
ROGELIO, GUILLERMO**

**A TODOS AQUELLOS QUE ME APOYARON PARA  
REALIZAR ESTE TRABAJO**



José A. Rodríguez Añón, Profesor Contratado Doctor del Departamento de Física Aplicada de la Universidade de Santiago de Compostela,

**INFORMA:**

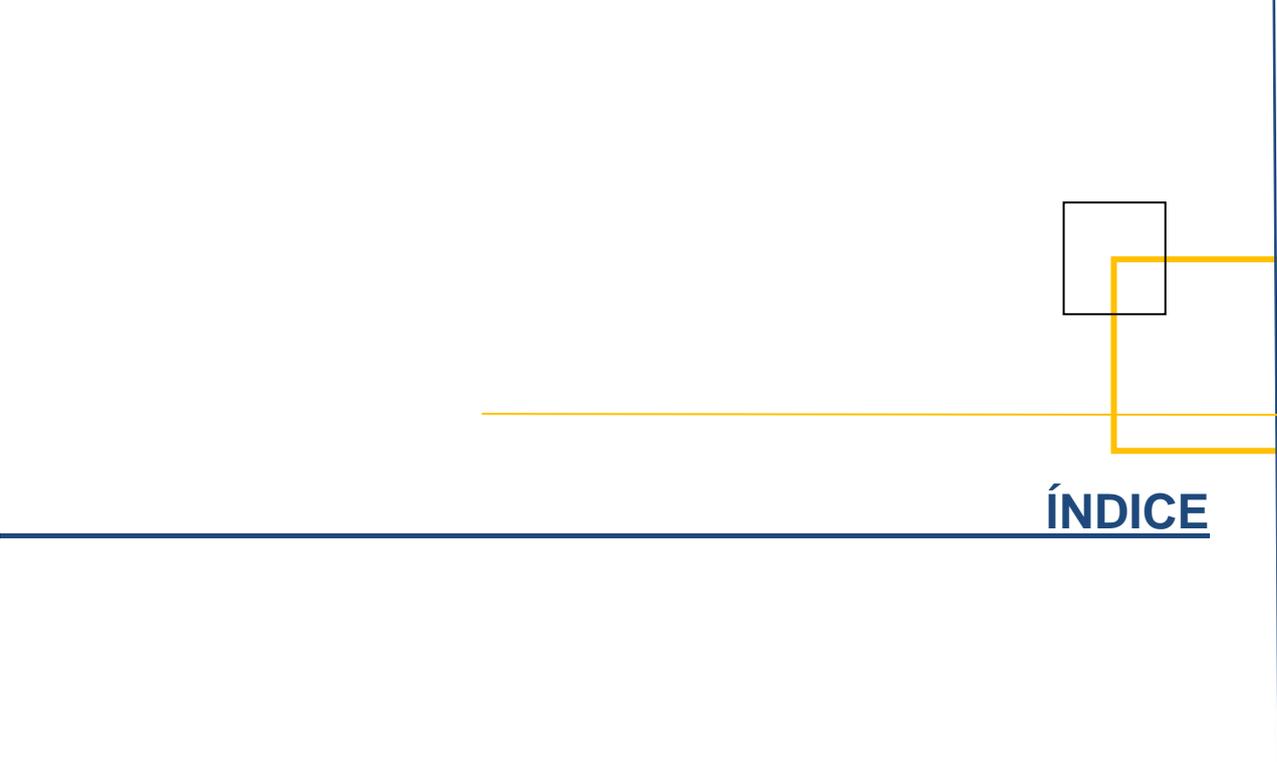
Que la memoria titulada “***Estudios de valoración energética de combustibles forestales para la prevención de incendios forestales en la Sierra de la Primavera (Jalisco, México) mediante calorimetría de combustión y ensayos de inflamabilidad***” ha sido realizada, bajo su dirección y la de los Doctores Jorge Proupín Castiñeiras y María Villanueva López, por el Licenciado D. Antonio Rodríguez Rivas, y constituye la Tesis doctoral que presenta para optar al Grado de Doctor por la USC.

Santiago de Compostela, a 3 de Septiembre de 2009

**Fdo. José A. Rodríguez Añón**

**Fdo. María Villanueva López**

**Fdo. Jorge Proupín Castiñeiras**

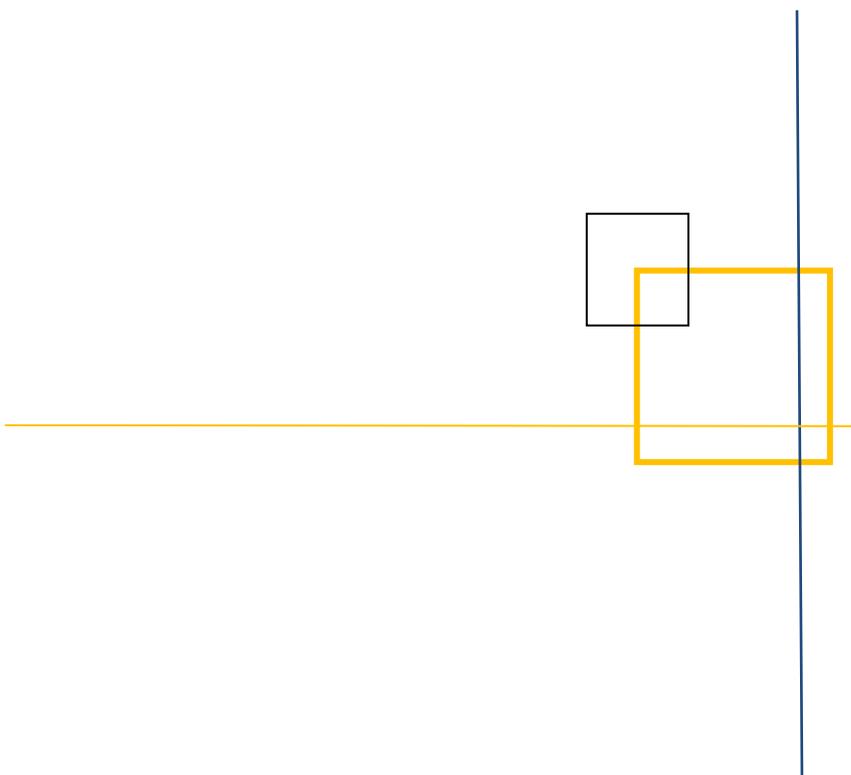
The image features a minimalist abstract design. A vertical blue line runs on the right side. A horizontal blue line runs across the lower portion of the page. A horizontal yellow line is positioned above the blue line, starting from the left and ending at a yellow square. The yellow square is partially overlapped by a smaller black square above it. The word 'ÍNDICE' is written in bold blue capital letters at the end of the blue line.

**ÍNDICE**



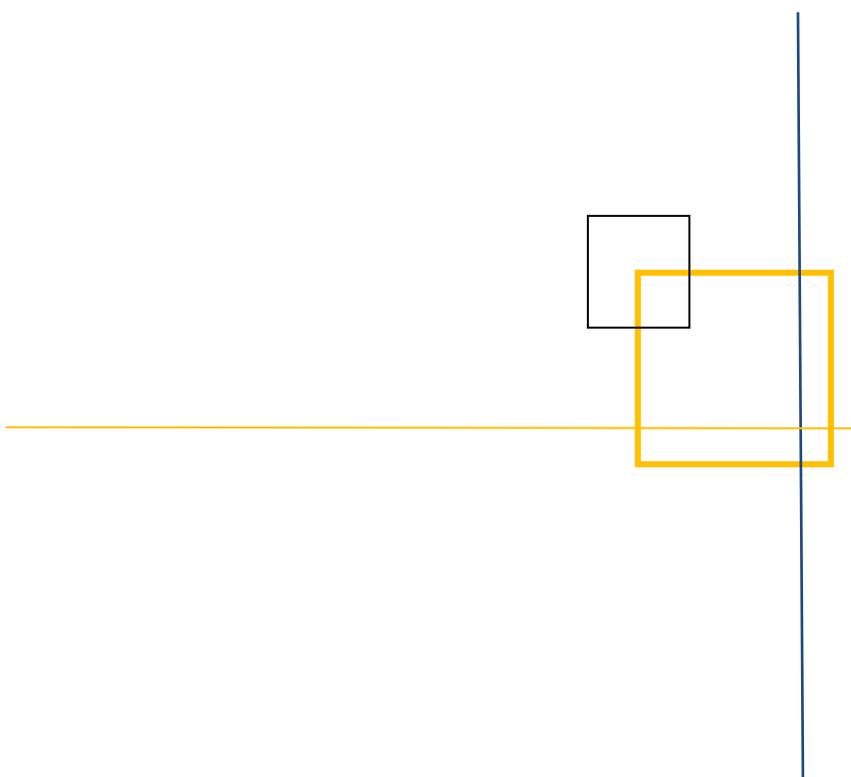
<b>ÍNDICE</b>	<b>PÁGINA</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Objetivos	2
<b>2. Proceso histórico de la protección forestal en México</b>	<b>3</b>
2.1. Análisis del Sector Forestal en México	3
2.2. Incendios Forestales en México	3
2.2.1. Historia de los incendios forestales	3
2.2.2. Causas, prevención, detección y combate de incendios forestales	4
2.3. Desarrollo de sistemas, programas e índices	5
2.3.1. Índices desarrollados en la Unión Europea con énfasis en España	5
2.3.2. Índices en América	8
2.3.3. Índices utilizados en México	10
2.3.4. Detección de incendios forestales en México	11
2.3.5. Causas e Importancia Ecológica del fuego	12
2.3.6. Normas y Reglamentos	13
2.3.7. Variables físico-químicas de combustibles forestales	13
2.3.7.1. Definiciones de variables	13
2.3.8. Variables químicas de combustibles forestales (resinas, aceites, ceras y extractos)	22
2.3.9. Localización de compuestos químicos en parte de la planta	23
2.3.9.1. Clasificación fisiológica de los compuestos químicos	24
2.3.9.2. Técnicas de extracción de compuestos químicos	24
2.4. Descripción de especies vegetales de México	28
<b>3. Materiales y Métodos</b>	<b>43</b>
3.1. Descripción del área de estudio	43
3.1.1. Geología	45
3.1.2. Vegetación	45
3.1.3. Clima	45
3.2. Técnica de muestreo	46
3.2.1. Premuestreo del material colectado	47
3.2.2. Recogida y Preparación del material vegetal colectado	48
3.3. Procedimiento de ensayo calorimétrico 1108 Parr	48
3.3.1. Evaluar y determinar el poder calorífico de las especies forestales en la Sierra de la Primavera (Jalisco, México)	50
3.4. Ensayos de inflamabilidad de combustibles forestales	50
3.4.1. Procedimiento para Ensayos de inflamabilidad	50
3.5. Procedimientos para determinar los parámetros químicos elementales	51
3.5.1. Datos de densidad, humedad y cenizas de bomba en (%)	52
3.5.2. Importancia de la determinación de la humedad en una especie forestal	52
3.6. Determinación de parámetros biológicos	52
3.6.1. Carga calorífica	53
3.6.2. Evaporación potencial (ETP)	53
3.6.3. Composición química de la madera	53
3.7. Variables a determinar o considerar en campo	55
3.8. Determinación de parámetros climáticos y tiempo atmosférico	56
3.9. Parámetros relacionados con el ambiente físico	57
3.10. Procesamiento de la imagen de satélite Quick bird 2002 y Aster 2007 (mapas de índices de riesgo)	59
3.10.1. Recopilación de información vectorial y raster	59
3.10.2. Corrección geométrica	59
3.10.3. Calibración de la imagen	59
3.10.4. Banda integrada de radiancia [ $W m^{-2} sr^{-1}$ ]	59
3.10.5. Promedio de banda de radiancia espectral [ $W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$ ]	60
3.10.6. Corrección del sombreado topográfico	60

3.10.7. Selección de áreas de entrenamiento y Clasificación supervisada	61
3.10.8. Procesamiento de imagen de satélite Aster	62
3.10.9. Elaboración de mapas temáticos del valor calorífico de las especies forestales	62
<b>4. Resultados</b>	<b>63</b>
4.1. La determinación y evaluación del poder caloríficos para especies Forestales	63
4.2. Resultados de experiencias de poderes caloríficos promedios	68
4.3. Ensayos de inflamabilidad de combustibles forestales	71
4.4. Procedimientos para determinar los parámetros químicos elementales	72
4.5. Datos de humedad, densidad y cenizas de bomba y extracto en (%)	73
4.6. Elaboración de tablas de índice de riesgos	78
4.7. Diseño de mapas de índice de riesgo	81
<b>5. Discusión de los resultados</b>	<b>87</b>
<b>6. Conclusiones</b>	<b>93</b>
<b>7. Bibliografía</b>	<b>95</b>



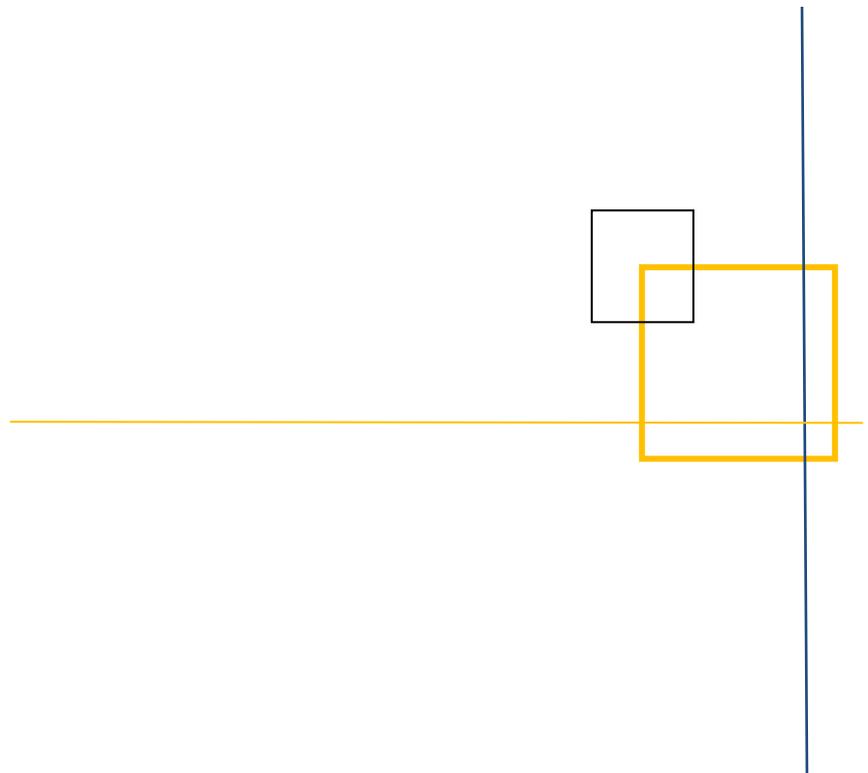
<b>FIGURAS</b>	<b>PÁGINA</b>
Figura 1. Área natural protegida Sierra la Primavera (Jalisco, México)	2
Figura 2. Distribución de componentes de <i>P. douglasiana</i>	27
Figura 3. Distribución de componentes de <i>P. oocarpa</i>	28
Figura 4. <i>Pinus oocarpa</i> Schiede ex Schltdl.	30
Figura 5. <i>Acacia pennatula</i> (Schitdl & Cham)	31
Figura 6. <i>Quercus resinosa</i> Liebm.	32
Figura 7. <i>Pinus douglasiana</i> Martínez	33
Figura 8. <i>Pinus devoniana</i> Lindley	34
Figura 9. <i>Rhynchelytrum repens</i> (Wild)	35
Figura 10. <i>Clethra rosei</i> Britton	36
Figura 11. <i>Verbesina greenmanii</i> Urb.	37
Figura 12. <i>Pinus halepensis</i> Miller	38
Figura 13. <i>Eucalyptus camaldulensis</i> Dehnh. var. <i>Camaldulensis</i>	39
Figura 14. <i>Pinus pseudostrobus</i> Lindl.	40
Figura 15. <i>Quercus magnoliifolia</i> Née	41
Figura 16. Mapa de localización del Campo Experimental Bosque Escuela en la Sierra de la Primavera (Jalisco, México)	43
Figura 17. Tipos de vegetación del Campo Experimental Bosque Escuela.	44
Figura 18. Mapa del modelo de elevación de la Sierra la Primavera (Jalisco, México)	44
Figura 19. Distribución espacial de temperatura promedio mensual en la zona de estudio	45
Figura 19 A. Distribución espacial de temperatura promedio mensual en la zona de estudio	46
Figura 20. Procedimiento para ensayos calorimétricos	50
Figura 21. Proceso de ensayos de inflamabilidad	51
Figura 22. Proceso completo de obtención de extractos	54
Figura 22 A. Secado del material vegetal	54
Figura 22 B. Colocación de muestra	54
Figura 22 C. Molido de la muestra	54
Figura 22 D. Muestra pesada y colocada en desecador	54
Figura 22 E. Muestra en aparato de extracción Soxhlet	54
Figura 22 F. Muestra en proceso de extracción	54
Figura 22 G. Matraz con acetona	54
Figura 22 H. Proceso de extracción de 6 a 8 horas	54
Figura 23. Mapa de cartografía del Bosque Escuela	58
Figura 24 A. Imagen QuickBird original	61
Figura 24 B. Imagen de iluminación	61
Figura 24 C. Imagen corregida iluminación	61
Figura 25. Comportamiento del valor calorimétrico mensual de especies forestales M1, M2, M3, M4, M5, M6	66
Figura 26. Comportamiento del valor calorimétrico de especies forestales M1, M2, M3, M4, M5, M6	66
Figura 27. Comportamiento del valor calorimétrico mensual de especies forestales M20s, M21 y M22	67
Figura 28. Comportamiento del valor calorimétrico de especies forestales M20s, M21 y M22	67
Figura 29. Comportamiento del valor calorimétrico mensual de especies forestales M10, M11 y M14	67
Figura 30. Comportamiento del valor calorimétrico mensual de especies forestales M18, M19 y M20 en 2004	68
Figura 31. Comportamiento del valor calorimétrico de especies forestales M18, M19 y M20 en 2004	68

Figura 32. Comportamiento del valor calorimétrico mensual combustible M13	68
Figura 33. Índice de riesgo para primavera 2005	82
Figura 34. Índice de riesgo para verano 2005	83
Figura 35. Índice de riesgo para otoño 2005	84
Figura 36. Índice de riesgo para invierno 2005	85
Figura 37. Comportamiento del poder calorífico entre especies de <i>Quercus</i> spp.	89



<b>TABLAS</b>	<b>PÁGINA</b>
Tabla 1. Clasificación del poder calorífico por Hernan.	16
Tabla 2. Clasificación del poder calorífico por Núñez, <i>et al.</i> , 1999	18
Tabla 3. Clasificación del poder calorífico por Núñez, <i>et al.</i> , 2000 (a)	19
Tabla 4. Cantidades de $\alpha$ Pineno <i>Pinus oocarpa</i> y <i>P. douglasiana</i>	26
Tabla 5. Cantidades de $\beta$ Pineno <i>Pinus oocarpa</i> y <i>P. douglasiana</i>	26
Tabla 6. Cantidades de Limoneno en <i>Pinus oocarpa</i> y <i>P. douglasiana</i>	26
Tabla 7. Cantidades de 1,8 Cineol en <i>Pinus oocarpa</i> y <i>P. douglasiana</i>	27
Tabla 8. Evaluación de especies forestales	47
Tabla 9. Clasificación de las especies en función de su inflamabilidad	51
Tabla 10. Criterios de inflamabilidad	51
Tabla 11. Calidad de estación o de sitio para <i>Pinus oocarpa</i> en la Sierra de la Primavera (Jalisco, México)	55
Tabla 12. Análisis del valor calorífico de especies forestales mediante la prueba de Duncan	64
Tabla 13 Análisis del valor calorimétrico de especies forestales mediante la prueba de Duncan	64
Tabla 14. Resultados de los promedios calorimétricos de especies evaluadas <i>Quercus resinosa</i> , <i>Clethra rosei</i> y <i>Verbescina greenmanii</i>	65
Tabla 15. Resultados de los intervalos de confianza pruebas LSD. <i>Eucalyptus camaldulensis</i> ; <i>Pinus halepensis</i> ; <i>Pinus pseudostrobus</i>	65
Tabla 16. Resultados de los intervalos de confianza pruebas LSD para el estiércol de ganado	66
Tabla 17. Valores HHV y LHV de la estación de primavera 2005	69
Tabla 18. Valores HHV y LHV de la estación de verano 2005	69
Tabla 19. Valores HHV y LHV de la estación de otoño 2005	70
Tabla 20. Valores HHV y LHV de la estación de invierno 2005	70
Tabla 21. Clasificación de poderes caloríficos	70
Tabla 21 a. Riesgo de especies con respecto a su poder calorífico	71
Tabla 22. Determinaciones de ensayos de inflamabilidad para las cuatros estaciones	71
Tabla 23. Composición química elemental de primavera 2005	72
Tabla 24. Composición química elemental de verano 2005	72
Tabla 25. Composición química elemental de otoño 2005	73
Tabla 26. Composición química elemental de invierno 2005	73
Tabla 27. Determinación de humedad para la estación de primavera 2005	74
Tabla 28. Determinación de humedad para la estación de verano 2005	74
Tabla 29. Determinación de humedad para la estación de otoño 2005	75
Tabla 30. Determinación de humedad para la estación de invierno 2005	75
Tabla 31. Determinación de porcentaje de extracto para la estación de primavera 2005	76
Tabla 32. Determinación de porcentaje de extracto para la estación de verano 2005	76
Tabla 33. Determinación de porcentaje de extracto para la estación de otoño 2005	77
Tabla 34. Determinación de porcentaje de extracto para la estación de invierno 2005	77
Tabla 35. Determinación del riesgo de incendio forestal de <i>Pinus oocarpa</i> Schiede ex Schlechtendal para la estación Primavera 2005	79
Tabla 36. Determinación del riesgo de incendio forestal de <i>Pinus oocarpa</i> Schiede ex Schlechtendal para la estación verano 2005	80
Tabla 37. Índice de riesgo de incendio forestal	81

Tabla 38. Clasificación de poder calorífico e inflamabilidad de especies forestales	<b>88</b>
Tabla 39. Clasificación de poder calorífico e inflamabilidad (redondeo) de especies forestales	<b>88</b>
Tabla 40. Índices de Riesgo de especies forestales en la Sierra de la Primavera (Jalisco, México)	<b>90</b>



A decorative graphic consisting of a vertical blue line on the right, a horizontal blue line at the bottom, and a horizontal orange line above it. Two overlapping squares are positioned in the upper right: a smaller white square with a black border and a larger yellow square with a yellow border.

# **PRESENTACIÓN**

## PRESENTACIÓN

Desde el principio de los tiempos el fuego ha sido un elemento modelador básico para todos los ecosistemas forestales de la Tierra.

Sin embargo su uso por parte del hombre para crear espacios abiertos que le permitiesen explotar agrícolamente la tierra tiene a penas 5.000 años, cuando civilizaciones tan importantes como la mesopotámica, egipcia o las culturas precolombinas, utilizaron el fuego como agente deforestador principal para crear las bases de sus bastos imperios.

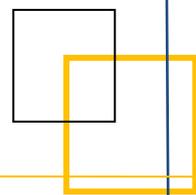
Pero es en los últimos 50 años cuando el hombre dejó de hacer un uso “sabio y racional” de este fenómeno natural y debido a diferentes condicionantes sociales, convertirlo en uno de los principales elementos de degradación del paisaje y responsable indirecto de los procesos de desertización que están causando trastornos sociales, económicos y políticos en el planeta.

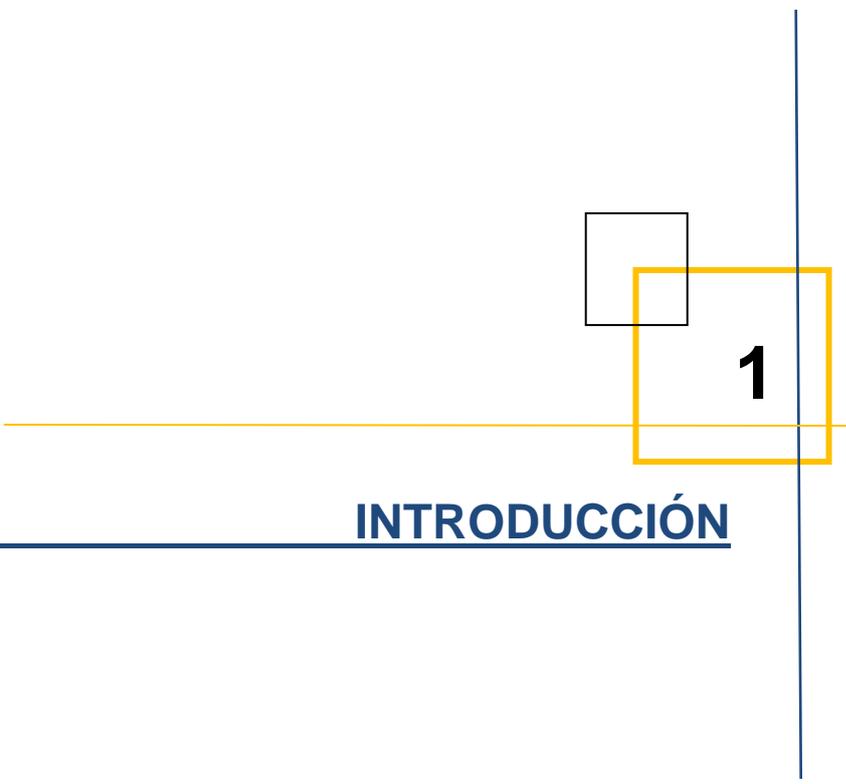
Esta evolución del fenómeno de los incendios forestales se debe principalmente al origen de los mismos, y que en a penas 100 años pasó de ser mayoritariamente de origen natural causado por la acción directa de los fenómenos atmosféricos, principalmente las tormentas eléctricas, a tener en la actualidad, en más de un 95 %, un origen antrópico, bien sea de forma accidental, bien sea intencionadamente.

Debido a los problemas globales que los incendios están causando en la sociedad actual, tanto su prevención como su extinción eficaz y rápida se está convirtiendo en una prioridad mundial y para la que se están desviando enormes recursos en I+D+i en forma de programas autonómicos, nacionales e internacionales.

Esta Tesis se centra en la mejora de un diseño conceptual de índice de riesgo que ha estado elaborando el Grupo de Investigación TERBIPROMAT desde mediados de los 90, para poder aplicarlo a un caso práctico en un Área Natural Protegida como es la Sierra de la Primavera y situada al oeste de la ciudad de Guadalajara (Jalisco-México). Estos índices de riesgo, o índices numéricos integrados que determinan la probabilidad que una formación forestal pueda ser el punto de inicio y propagación de un incendio en función de diferentes parámetros físico-químicos y ambientales, se están convirtiendo en elementos claves para la prevención y extinción de incendios forestales.

Esperamos que de los resultados de este y otros trabajos de investigación dependerá en gran medida que nuestros hijos puedan ver un mundo en “color” y no en el “blanco y negro” que los incendios forestales dejan a su paso sobre la faz de la Tierra.



A decorative graphic in the bottom right corner of the page. It features a vertical blue line on the right side. A horizontal blue line extends from the left edge of the page towards the center. A horizontal yellow line extends from the center towards the right, overlapping the vertical blue line. Two squares are positioned above the yellow line: a white square with a black border on the left, and a yellow square with a yellow border on the right. The number '1' is centered within the yellow square.

**1**

## INTRODUCCIÓN



## 1. INTRODUCCIÓN

La Sierra de la Primavera (SLP), situada al oeste de la ciudad de Guadalajara (Jalisco, México), constituye el principal regulador climático de la zona conurbana de Guadalajara.

Esta formación forestal fue declarada como Área Natural Protegida en el Diario Oficial de la Federación el 6 de marzo de 1980, siendo su clasificación específica actual como Área de Protección de Flora y Fauna, tal y como se define en la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (SEMARNAP, 1997). La superficie que se encuentra bajo este régimen de protección es de unas 30.500 hectáreas de las 36.000 totales del área forestal (SEMARNAT, 2000).

La Sierra de la Primavera presenta cinco tipos de vegetación característicos, como son el bosque de encino, el bosque de encino–pino, el bosque de pino, el bosque tropical caducifolio y la comunidad riparia. En estas cinco comunidades forestales se han reportado 961 especies de plantas vasculares que se distribuyen en 6 divisiones pertenecientes a 107 familias, 419 géneros, de éstas sólo dos especies son endémicas *Mammillaria jaliscana* y *Agave guadalajarana*. Por lo que para el adecuado manejo de esta área forestal tan peculiar se dividió con 7 zonificaciones en base a su uso y potencial vocación natural del terreno (SEMARNAT, 2000).

Existe una gran cantidad de investigaciones referentes a los diferentes componentes físicos y biológicos de la Sierra de la Primavera, entre los que podemos destacar los inventarios florísticos y entomológicos, así como el análisis y manejo de estos componentes mediante el uso de sensores remotos para determinar las coberturas del suelo mediante varios sistemas de clasificación de la imagen de satélite. Por el contrario existen muy pocos estudios referentes al aspecto de la protección forestal y ambiental para la vegetación y el entorno, tales como la presencia de plagas forestales por insectos sobre bosque natural y plantaciones forestales, o los incendios forestales que afectan anualmente a una gran cantidad de superficie tanto de vegetación natural como de plantaciones.

De forma particular, en los procesos de prevención y extinción de incendios forestales se presentan fuertes deficiencias tanto a la hora de su aplicación y acciones, como a nivel de normas Federales, y/o programas Municipales y Estatales. A estas carencias se le añaden una descoordinación de los diferentes niveles de Gobierno con respecto a las acciones preventivas y de combate a implementar. Esto hace que la frecuencia e intensidad de los incendios forestales en la Sierra de la Primavera se ven favorecidas por la falta de un programa preventivo de riesgo de incendios forestales. En este ámbito de trabajo encontramos algunos estudios referentes al efecto de fuego en la regeneración de áreas afectadas y sin afectación, el efecto del fuego en las condiciones edáficas, evaluación del impacto del fuego en los combustibles forestales y la implementación de un sistema de alerta temprana contra fenómenos meteorológicos extremos e incendios forestales.

En la Sierra de la Primavera los programas de prevención y extinción de incendios muestran resultados muy desalentadores debido a la falta de eficacia en los mismos. Por lo tanto, este proceso tan dañino despierta un verdadero deseo de resolver esta problemática y su impacto ecológico en un ecosistema forestal tan importante y necesario. Con este trabajo se pretende generar una herramienta que pueda aplicarse con éxito para la prevención, y en su caso en el combate eficaz de incendios forestales en la Sierra de la Primavera.

Para desarrollar este trabajo se debe realizar un análisis fisicoquímico tanto de los combustibles ligeros mediante el análisis calorimétrico, ensayos de inflamabilidad, análisis químico elemental de las diferentes especies vegetales, así como el análisis de las variables meteorológicas, topográficas y del medio físico para obtener el riesgo de incendio forestal en la Sierra de la Primavera.

En la Figura 1 se recoge la situación real de la zona de estudio (Díaz, 2004).

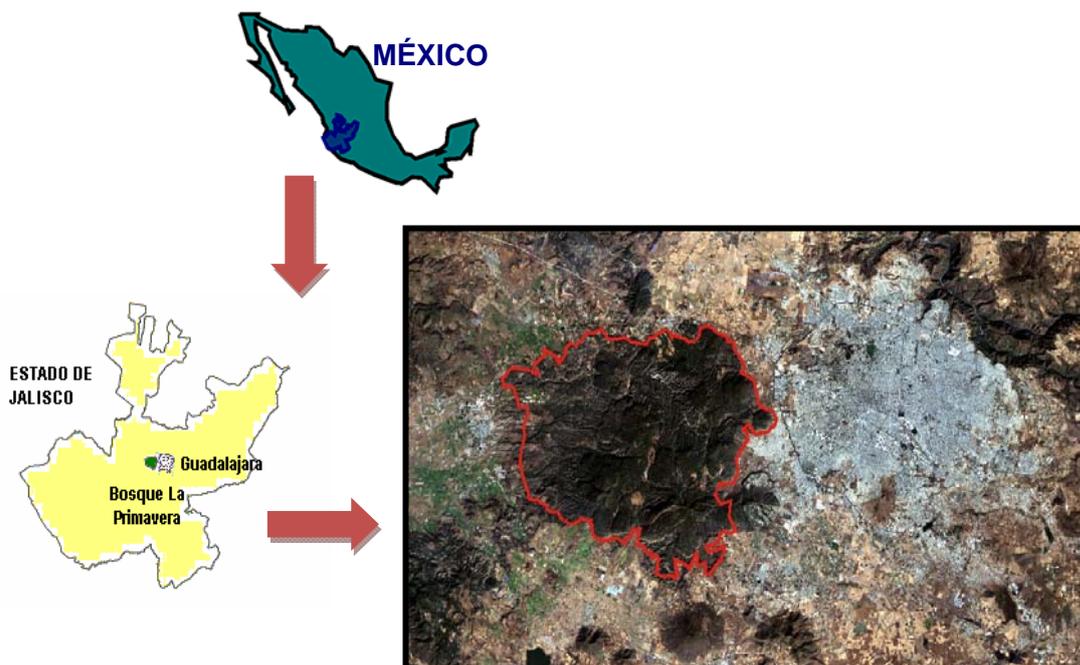


Figura 1. Área natural protegida Sierra de la Primavera (Jalisco, México).

## 1.2. OBJETIVOS DEL TRABAJO

Al comienzo de este trabajo de investigación se plantearon 3 objetivos principales:

1. Evaluar y analizar mediante análisis factorial el comportamiento del valor calorimétrico de especies forestales desde Agosto de 2003 a Marzo de 2004 para determinar su magnitud y establecer su importancia en los incendios forestales.
2. Analizar el comportamiento del poder calorífico y ensayos de inflamabilidad en las cuatro estaciones del periodo 2005.
3. Desarrollar los índices de riesgo o probabilidad de incendio forestal mediante la elaboración de mapas de índice de riesgo mediante procesamiento de imagen de Satélite de alta resolución y Aster (píxel de 15 y 90 m) para realizar las separaciones espectrales de los diferentes tipos de vegetación.

Para ello se llevó a cabo una profunda revisión de los trabajos de investigación que el Grupo de Investigación TERBIPROMAT de la USC realizó durante los años 1994 al 2007 en diferentes formaciones forestales de Galicia y de los EE.UU. a través de varios años de colaboración con el USDA en el desarrollo de estrategias aplicables en el campo de la prevención de incendios forestales. Estas 25 publicaciones internacionales, unidas a diferentes proyectos y contratos de investigación con empresas, administración autonómica y nacional, están sirviendo de referencia para la elaboración de un índice de riesgo aplicable a las formaciones forestales de la Sierra de la Primavera, y a lo largo de todo este estudio se realizan diferentes comentarios sobre los mismos como un marco comparativo básico.

**PROCESO HISTÓRICO DE LA PROTECCIÓN  
FORESTAL EN MÉXICO**



## **2. PROCESO HISTÓRICO DE LA PROTECCIÓN FORESTAL EN MÉXICO**

### **2.1. Análisis del Sector Forestal en México**

La República Mexicana, con una superficie de 1.964.375 km<sup>2</sup>, es el decimocuarto país en el mundo en extensión. En esta superficie se concentran la mayor cantidad de vertebrados terrestres y plantas vasculares del mundo superando por ejemplo en conjunto la biodiversidad de EE.UU. y Canadá. Esto convierte a México en el primer país del mundo en biodiversidad de reptiles, en el tercero en aves y en el cuarto lugar en mamíferos terrestres (SEMARNAT, 2001).

En lo referente a bosques y selvas, éstos cubren una superficie aproximada de 5,3 millones de hectáreas, de los cuales el 80 % de la superficie forestal son de propiedad ejidal y comunal, el 15 % de propiedad privada y tan solo el 5 % es de propiedad del Estado (SEMARNAT, 2001). En el interior de éstas áreas forestales habitan aproximadamente 12 millones de habitantes en condiciones de extrema pobreza y migración. Las principales especies maderables de importancia económica corresponden al género de *Pinus* y *Quercus*, y que son tan sólo el 5 % de la producción nacional maderable (SEMARNAT, 2001), y que según el Inventario Nacional Forestal Periódico cuenta con un potencial comercial de 21,6 millones de hectáreas (SEMARNAT, 2001).

Dentro de este inventario se ha determinado que las principales causas de la degradación y deforestación de los recursos naturales son la expansión acelerada de áreas de cultivo y su sobreexplotación, y que genera como consecuencias inmediatas la degradación y pérdida de suelo mediante procesos de erosión hídrica erosión, sedimentación de material arrastrado en lagos y ríos, disminución de agua utilizable y recarga en mantos acuíferos, inundaciones, y la pérdida de la fertilidad del suelo.

### **2.2. Incendios Forestales en México**

#### **2.2.1. Historia de los incendios forestales**

El fuego es uno de los fenómenos físico-químico más comunes en la naturaleza. Desde el punto de vista físico es un plasma radiante en el cual la alta temperatura arranca algunos electrones de sus núcleos, haciendo de este plasma una mezcla de electrones libres o núcleos atómicos (Sagan, 1982).

El fuego puede ser a la vez considerado como el mayor descubrimiento de la humanidad, y que ha permitido a ésta la diferenciación del hombre del resto del reino animal (Asimov, 1982).

Las evidencias más antiguas del uso del fuego por parte de los prehomínidos datan de la caverna de Chukutián (Pekín, China) hace 500.000 años (Howell, 1979).

El hombre primitivo ya dominaba el fuego cuando arribó al continente americano hace aproximadamente 40.000 años. En esos momentos el fuego era utilizado en diversas actividades como la producción de calor, cocimiento de alimentos en teas, como herramienta para facilitar la caza, como herramienta bélica, para abrir paso y "aclarar" los densos bosques, o los rituales.

En la actualidad, y desde un punto de vista social, se entiende por incendio todo proceso en donde un fuego no controlado puede abrasar algo que no está destinado a quemarse. Centrando la definición en el medio forestal, se puede definir el incendio forestal como un siniestro causado intencional, accidental o fortuitamente por el fuego, que se presenta en áreas cubiertas de vegetación variada o asociaciones vegetales, y que se propaga libremente por no estar bajo control humano generando daños no deseados para éstas.

#### **El México pre-Colombino**

En México-Tenochtitlán, lo que hoy en día se conoce como el Valle de México, convivían un grupo de unos 300.000 habitantes. En aquel tiempo la presencia de incendios forestales de origen humano era escasa, y es posible que a partir de este momento su incremento se debiera al uso y actividades de la población (Vaillant, 1973). Esto generó que en las comunidades de Teotihuacan los siniestros deberían ser comunes por la existencia de hornos de carbón para la elaboración de estuco en abundancia en el siglo IX (Vázquez, 1982).

La cultura Teotihuacana contaba con una elegante arquitectura monumental en la que se empleaban grandes cantidades de madera procedente de abundantes y cuidados pinares y encinares. Por lo que se sabe poseían un marcado espíritu conservacionista sabedores de los bienes y servicios que ofrecían, la fauna y flora, y protegían sus recursos forestales haciendo que estos persistieran durante muchos siglos (Aguilera, 1985).

Las primeras Leyes para el cuidado de los bosques de las que se tiene referencia en México datan del Rey texcocano Netzahualcoyotl. En ellas se recoge que el Rey personalmente salía a vigilar su estricta observancia y promovió al pueblo un amor y respecto al árbol (Torres, 1923; Rodríguez, 1994).

El Rey chichimeca Nopaltzin estableció las primeras normas para restringir la quema de pastos y montes, y su incumplimiento era severamente castigado (Villaseñor, 1980).

Alrededor de los 1500 a. C. los Olmecas comenzaron la práctica del sistema de roza, tumba y quema, que posteriormente fue utilizado por los mayas y que en la actualidad se sigue empleando. Una práctica agrícola en la que se desmontaba, se utilizaba el fuego y se realizaban siembras en suelos planos, aluviales, y que obtuvieron buenos y constantes rendimientos. Pero el aumento poblacional obligó a utilizar paulatinamente suelos pedregosos y poco profundos de lomeríos y montes, y un posterior desmonte de las selvas. Los Olmecas se dieron cuenta que al cabo de unos pocos años el rendimiento en los cultivos se reducía, pero al dejar descansar varios años las parcelas volvían a ser productivas. Estas observaciones hicieron que esta técnica agrícola se generalizara.

### **Del México del S. XV hasta nuestros días**

La agricultura en terrenos con vocación forestal se intensificó después de la conquista. Esto aunado a la elaboración de carbón, actividades de minería, ganadería y la gran demanda de combustibles que caracterizó a la Colonia y que era satisfecha con madera, ocasionó una mayor explotación de los bosques e intensificó paralelamente la frecuencia de los incendios (Gutiérrez, 1989).

Los primeros intentos oficiales de la Nueva España para la prevención y combate de incendios forestales datan de la Ley IX de 1532 (Esquinca, 1950).

Por legado de la Colonia se tenían Regidores de Montes que se encargaban del cuidado y conservación de los montes públicos de la comuna, y se contaba con auxiliares monteros para la vigilancia efectiva de los incendios forestales, así como a los vecinos se les obligaba a una extinción inmediata del fuego una vez iniciado (Quevedo, 1928).

Se emitieron diversas ordenanzas y decretos desde la época colonial al México Independiente y en los que se buscaba infructuosamente la protección del bosque.

En 1853 se crea la Secretaria de Fomento, y que posteriormente decide organizar por primera vez un servicio forestal en 1861, y que posiblemente fue el primero en América (Verduzco, 1959).

Posteriormente se crea la comisión para la protección forestal por 1900, la cual es presidida por Quevedo, y que posteriormente será transformada en la Junta Central de Bosque y Arbustos (Anónimo, 1979).

Después de la Revolución se conforma un cuerpo encargado de la vigilancia formado por personal improvisado y con pocos conocimientos técnico-legales en la materia (Moncayo, 1981).

La primera Ley forestal, que incluye 6 temas con 22 subtítulos, tiene un tercer tema dedicado a la protección forestal e incendios, y especialmente su subtítulo 15 que aborda particularmente los incendios forestales.

### **2.2.2. Causas, prevención, detección y combate de incendios forestales**

Una de las principales causas reconocidas de incendios forestales en México es la quema de pastos para la obtención del pelillo (Quevedo, 1928 a).

En cambio Gaitán en 1928 menciona que los incendios forestales son el principal agente que merma los bosques mexicanos y describe varias causas de éstos, por lo que Gaitán concluye que es más fácil prevenir el mal que tenerlo que combatir.

En ese mismo año se inicia la instalación de las primeras torres de observación en el cerro Rumurachic, Chihuahua (Anónimo, 1928).

Se entiende como prevención a toda aquella labor que se destina para evitar o reducir la probabilidad de ignición de los incendios forestales. La medida de prevención contra los incendios más eficaz es la cultura del pueblo, de los que viven o trabajan en el monte. Otro punto que aborda la prevención global es un seguro contra incendios. Esta protección era insuficiente por el momento social, económico y político que atravesaba el país (Quevedo, 1928 a). En estos momentos la superficie arbolada que conformaba los bosques comunales, ejidales y nacionales constituían un área cubierta de 25 millones de hectáreas, y la Dirección General Forestal contaba sólo con 259 guardas o celadores de impuestos. Es decir, 1 guarda para 96.000 hectáreas mientras que en España 1 guarda cubría solamente 3.500 hectáreas.

En el año de 1934 se crea el Departamento Autónomo Forestal de Caza y Pesca, del cual fue el primer titular fue el Ing. Quevedo y el responsable de la oficina de incendios el Ing. Gaitán. El principal problema de esta oficina era la gran escasez de recursos, y que entre otras cosas impedía tener un registro de los siniestros que se producían en la República Mexicana.

Durante los años treinta continuaron las gestiones ante los Gobiernos Estatales para la prevención y combate de incendios forestales, y en esos momentos algunas dependencias como Ferrocarriles Nacionales que apoyaban la distribución de madera crearon cuerpos voluntarios. En un primer momento se contaba con 1.608 elementos llegando finalmente a un total de 27.676 miembros en 1938. La mayor parte de este personal eran principalmente campesinos, cuestión que originó una ineficiente supervisión y funcionamiento de estos cuerpos. Y así en 1938, aunque las estadísticas indicaban solamente las acciones para la extinción de varios siniestros sin concretar números, se elaboraron los primeros mapas de incidencia.

Para el año de 1939 se crea la Secretaría de Agricultura y Ganadería. Esta nueva Secretaría sustituye el Departamento de Forestal de Caza y Pesca, e incluye en su organigrama el Servicio de Inspección y Vigilancia Forestal para la protección y conservación de los bosques (García, 1987). En esa década se comienzan las labores de apoyo aéreo para la detección de incendios en México.

En 1941 se realizó la I Convención Forestal Nacional. En ella que se presentaron 198 ponencias, de las cuales 6 se referían específicamente a los incendios forestales. Para 1943 se crean las Unidades Industriales de Explotación Forestal, y que contribuyeron mucho en la prevención y combate de incendios. Un paso más en la organización de los medios contra incendios es la creación de las Delegaciones Forestales creadas en el año 1951.

El Presidente López Mateos a inicios de los años sesenta aprueba el programa quinquenal de prevención y combate de incendios forestales (Beltrán, 1961), y que fue la primera acción contundente y mejor organizada contra los incendios forestales en el país (Rodríguez, 1994). Este programa se implantó en el Valle de México de 1961 a 1964, debido a que era la zona con una mayor cantidad de incidentes en toda la República. Este programa contaba como medios materiales en 1964 con 3 casetas, 3 torres de vigilancia, 7 brigadas con 75 hombres apoyados por 10 vehículos el Departamento de Prevención y Combate de Incendios. El presupuesto total en 1960 era de 150.000 \$. Este programa incrementó sus presupuestos en años posteriores alcanzando los 26.842.574 \$, y con lo que se adquirieron 5 helicópteros que apoyaron en la detección, se crearon 48 brigadas con 528 elementos, se instalaron 48 torres de observación con localizadores y algunas de ellas con aparatos de radio, y 48 casetas alojamiento-bodega. De manera complementaria los aviones de las Unidades Industriales colaboraron en la detección de incendios (Rodríguez, 1994).

Aunque con ciertos altibajos durante la décadas de los setenta y ochenta, el programa de protección se fue fortaleciendo gradualmente.

En 1986, y de forma experimental, se prueba por primera vez en México equipo aéreo para el combate utilizando un helicóptero cisterna canadiense con tanque con capacidad para 1.200 litros (Galeote, 1987).

La SARH contó con un presupuesto en 1983 de 20.400.000 \$ más otros 15.500.000 \$ para el pago de salarios a las cuadrillas de prevención y combate de incendios forestales.

### **2.3. Desarrollo de sistemas, programas e índices**

Para predecir mejor la ignición y propagación del fuego es necesario en primer lugar detectar áreas con alto peligro. De forma habitual las causas de ignición están relacionadas con la actividad humana, por lo que la escala del fuego depende de factores tales como el estado de agua en la vegetación, topografía y dirección del viento. Este razonamiento nos lleva a entender como factor importante en la detección de incendios forestales el estado del agua en la vegetación (Maki *et al.*, 2004).

En la actualidad se emplean de forma combinada una gran cantidad de variables topográficas, físicas, químicas y biológicas, que se apoyan en cartografía digital y uso de imágenes de satélite, con la finalidad de crear o diseñar modelos de riesgo para la prevención de incendios forestales.

En la actualidad es habitual utilizar de forma combinada para el desarrollo de índices de riesgo la información obtenida de las imágenes de satélite (temperatura de superficie y humedad de la superficie forestal), la procedente de estaciones meteorológicas (Aguado *et al.*, 1998) y las características propias de los combustibles (cantidad, distribución, humedad o tipos), e integrarla toda ella mediante sistemas de información geográfica.

#### ***2.3.1. Índices desarrollados en la Unión Europea con énfasis en España***

El Forest Fire Management and Fire Prevention Systems (FOMIS), es un proyecto internacional parcialmente financiado por la Comisión Europea (DGXII) dentro IV Programa Marco, Cima y Medio Ambiente en su punto 2.3.4, *Tecnología para la prevención y reducción de desastres naturales*, que emplea cartografía de combustibles forestales a partir de imágenes de satélite de alta resolución TM y Spot Pan en dos regiones diferentes, Grecia y Galicia (España). En este trabajo se utilizaron una gran cantidad de números de clases y subclases de combustibles (divididas por la especie predominante: edad, suelo y altitud) junto con las bandas espectrales e información auxiliar (textura, elevación y orientación).

A lo largo de este estudio, y para realizar una clasificación de la cobertura de suelo mediante el empleo de imágenes de satélite, se utilizó el método de máxima probabilidad.

El resultado para Galicia, al combinar las seis bandas espectrales de TM junto con una banda de textura a partir de Spot Pan nos da una verificación de la clasificación entre el 76 y 86 % de exactitud. Las categorías de la leyenda o “clases” que fueron mejor discriminadas son: hojarasca amplia bajo arbolado (91,5 %), pasto basto (89 %), pasto fino (84,5 %), matorral bajo (78 %) y matorral bajo arbolado (77,5 %). Este proceso es el inicio del diseño de una metodología operativa para la cartografía de combustibles, obteniendo por primera vez una información de alta calidad y que los potenciales usuarios pueden utilizar como una herramienta fiable para crear y actualizar los propios mapas de combustibles a escala 1:50.000 y poder detectar cambios entre fechas y recopilación de información sobre el bosque (Vázquez *et al.*, 1999).

Debido a los fuertes impactos ocasionados por los incendios forestales en los países mediterráneos, se conformó en 1977 un Grupo de Investigación dentro del Joint Research Centre (JRC) con la finalidad de desarrollar y mejorar los métodos para la evaluación del riesgo de incendios forestales a escala europea, y que se puede consultar en <http://natural-hazards.jrc.it/fires/risk> (Chuvienco *et al.*, 2004).

Este grupo busca crear un índice avanzado o integrado de peligro de incendio a nivel europeo, y que se obtendría mediante la combinación de un índice dinámico en el que se considera el estrés hídrico de la vegetación y el grado meteorológico de peligro, y un índice estructural considerando la probabilidad de ocurrencia de incendio y la vulnerabilidad al mismo. Actualmente los dos componentes ya se encuentran estructurados (San Miguel-Ayanz *et al.*; 2002; Chuvienco *et al.*, 2004). En este modelo, el índice de probabilidad de ocurrencia estima la probabilidad para que se inicie un incendio de acuerdo a tres variables a largo plazo: combustibles disponibles, variables topográficas y variables socio económicas. Este índice considera el riesgo de probabilidad de ignición que para el sur de Europa se calcula mediante un tamaño de celda de 1 km<sup>2</sup> (Sebastián *et al.*, 2001; Chuvienco *et al.*, 2004).

El índice de vulnerabilidad estima el daño probable que puede ocasionar un incendio en una determinada área. Esta evaluación es de importancia en áreas medioambientales con susceptibilidad a la erosión, alteración del balance hídrico y en áreas cercanas a asentamientos humanos. Este índice se calcula solamente para el sur de Europa y considera tres factores principales:

1. La erosión potencial, que es obtenida del tipo de suelo, pendiente y el régimen de lluvias.
2. El nivel de protección de una determinada zona considerando su fragilidad y su interés medioambiental.
3. La distancia a los asentamientos humanos, considerando las vidas humanas y propiedades en peligro.

Por el momento no se han integrado estos factores. En un futuro este estudio integrado conformará un índice estructural de riesgo de incendio a largo plazo aportando un área propensa a la ocurrencia del incendio y su posible pérdida potencial (Chuvienco *et al.*, 2004).

Para el índice dinámico se determinan los índices meteorológicos a partir de diferentes estaciones, y el estrés de la vegetación (San Miguel-Ayanz *et al.*; 2002, Chuvienco *et al.*, 2004). La información meteorológica se obtiene de una red completa con que se cuenta en toda Europa y la cuál crea una malla de 50 x 50 km en el que se utilizan seis índices diferentes y que actualmente se usan en el sur de Europa. Estos índices se calibran y se validan con el JRC y con los datos de los incendios ocurridos en el sur de Europa. Esto hace que la capacidad de pronosticar para el sur de Europa un incendio utilizando el JRF sea de 1 a 3 días durante la temporada de incendios. Estos pronósticos se envían los resultados a las agencias de protección civil de Europa a través de Internet.

Para obtener la información del estrés de la vegetación se utilizan las imágenes obtenidas a partir del satélite NOAA-AVHRR empleando el VSI (Vegetation Stress Index), y que se basa en la pendiente acumulada de verano a partir del Índice diferencial de vegetación normalizado (NDVI) (Illera *et al.*, 1996 b) para un periodo de diez días (Chuvienco *et al.*, 2004).

En la actualidad se está desarrollando el proceso de integración de los dos índices para conformar un índice dinámico de riesgo de incendio. El siguiente paso sería integrar el índice estructural con el dinámico para conformar el índice integrado o avanzado de riesgo de incendio.

En Europa, y siguiendo la metodología propuesta por Burgan (Burgan *et al.*, 1998) y desarrollada y contrastada en los Estados Unidos, se consideran tradicionalmente varios factores independientes a los índices estructurales o dinámicos para el cálculo de los índices de riesgo. Este índice se conoce como índice potencial de incendio (FPI) (Sebastián *et al.*, 2002 a; Sebastián *et al.*, 2002 b.; Chuvienco *et al.*, 2004). Este modelo se compone de tres variables que se relacionan con la vegetación:

1. Porcentaje de combustible vivo y denominado como “live ratio”.
2. Contenido de humedad de la vegetación muerta.
3. Tipo de combustible.

Para determinar el "live ratio", que en sí es el porcentaje de combustible vivo con respecto al total de combustible, se hace una comparación actual y de máximos del NVDI en cierta área y periodo. El porcentaje de vegetación que se considera como combustible muerto puede ser determinada a partir de porcentaje de combustible vivo.

El contenido de humedad de combustibles finos y muertos se obtiene a partir de parámetros meteorológicos. Aquí se consideran como combustibles muertos aquellos que tardan diez horas en perder el 63 % de su humedad inicial.

La clasificación de los modelos de combustibles se utiliza para asignar los valores de humedad de extinción de los combustibles muertos, calculándose mediante el cruce de mapas entre el CORINE land cover y el mapa de vegetación de Europa.

El cálculo del PFI se realiza mediante el JRC utilizando pronósticos meteorológicos con la finalidad de actualizar el índice. La validación entre ambos aún no se ha realizado.

Por lo tanto, los índices en Estados Unidos, Canadá y la Unión Europea, aún no tienen en operación un índice integrado que combine todos los módulos propuestos, siendo los meteorológicos y el uso de imágenes de satélite los más desarrollados. La diferencia entre los países americanos y la Unión Europea es que para Europa no se cuenta con índice de vulnerabilidad y que sería conveniente incluirlo en los análisis de riesgo natural (Chuvieco *et al.*, 2004).

En España la prevención de incendios forestales en la zona mediterránea está estrechamente relacionada con la actividad humana, ya que mayoritariamente éstos son intencionados o por negligencia, y con las condiciones meteorológicas. Esto ha sido la causa principal por la tradicionalmente se han elaborado diferentes índices de riesgo con un perfil meteorológico. Entendiendo el índice de peligro como un instrumento de predicción que cuantifica el riesgo de incendio a partir de una serie de factores, bien permanente o bien variables, que originan la ignición o propagación del fuego (Vélez, 1985). Por lo tanto, estos índices de peligro de incendio utilizan diferentes variables meteorológicas para estimar la posibilidad de iniciarse un incendio.

También existen otros índices de riesgo de mayor complejidad, y en los que se combinan una gran cantidad de factores a partir de modelos teóricos y/o empíricos para conseguir índices de ignición y propagación.

Aunque todos estos diseños de índices de riesgo varían de complejidad, el objetivo común de todos ellos es conseguir mediciones simples y comparables con la inflamabilidad del combustible forestal diariamente. El diseño de estos índices meteorológicos se basa en algunas ocasiones en fundamentos físicos que rigen la difusión de la humedad en los combustibles, y que se obtienen a partir de experimentos en laboratorio en donde se controlan las variables que intervienen en el proceso. Por el contrario en otros índices el mayor peso de la predicción se basa en experimentos realizados en campo, ya que en ellos se reproducen e integran de forma más adecuada los efectos de numerosas variables difícilmente cuantificables en el laboratorio (Chandler *et al.*, 1983; Aguado *et al.*, 1998).

La Dirección General de la Conservación de la Naturaleza (DGCN) considera el peligro de incendio como la contingencia o posibilidad de que se produzca un incendio en un determinado momento sobre un área (Velez, 2000; Chuvieco *et al.*, 2004).

El sistema para medir estas variables se conoce como Grado Actual de Peligro de Incendios Forestales. Este se conforma en base a tres elementos, un índice dinámico y que es el grado meteorológico de peligro, un índice estructural, y el índice local de incendio. Para el índice dinámico se requieren variables meteorológicas como humedad relativa, temperatura o viento, y variables topográficas como pendiente u orientación. Para el índice local se considera la frecuencia y causalidad de incendios presentes en los últimos años y la combustibilidad de la vegetación.

El riesgo local de incendio, que es una propuesta de un índice de acuerdo a las estadísticas obtenidas por el Servicio Forestal, se conforma de tres subíndices: riesgo espacial, causalidad y combustibilidad.

La probabilidad de que se presente un incendio en un lugar durante el año se le conoce como riesgo espacial. Para establecer la frecuencia media anual de incendio en el índice se manejan seis intervalos, desde el riesgo bajo (<1) al extremo con valores (>10). La combinación de este índice con un coeficiente temporal de riesgo puede ponderar la frecuencia en función del mes, el día de la semana y la hora del día. Al resultado obtenido se le conoce como riesgo espacio-temporal y estima la probabilidad de incendio en lugar y hora.

El índice de casualidad establece la peligrosidad que se le atribuye a la causa y frecuencia cuando éstas se presentan. Con ello se obtiene la frecuencia de cada una de las causas en determinado lugar. Con cada una de las posibles causas se obtienen los coeficientes de peligrosidad o eficacia de la incidencia en las causas. Así, los incendios intencionados presentan una eficacia del 100 % (produciendo un incendio cada vez que actúan), las causas por negligencia un 50 % y accidentes o rayos del 10 %. Los resultados del índice se manejan en 5 intervalos entre 1 y 10, siendo la peligrosidad baja (<1) a grave con valores (>7).

La presencia de las distintas formaciones vegetales ponderadas se conoce como índice de combustibilidad. En este índice se consideran la continuidad y la acumulación de los combustibles vegetales, y que van a ser condicionantes de la transmisión de calor y la cantidad de combustible disponible. Este índice no considera el estado hídrico de la vegetación, ya que este parámetro se considera en el grado meteorológico de peligro.

Se deben considerar una gran cantidad de parámetros para las medidas de combustibilidad. Entre ellos destacar la cantidad de combustible, la relación área superficie al volumen de las partículas, la densidad, la continuidad vertical y horizontal, etc. (Chuvienco *et al.*, 2004).

La clasificación de las diferentes formaciones vegetales en base a modelos de combustible, como los propuestos por la DGCN, se hace mediante un programa de simulación BEHAVE (Anderson, 1982; Rothermel, 1983). Mediante este proceso se crearon trece modelos de combustibles en función del elemento propagador del fuego y se agruparon en cuatro categorías:

1. Modelos 1 al 3, el propagador principal el pasto.
2. Modelos 4 al 7, el propagador principal es el matorral.
3. Modelos 8 y 9, el propagador principal es la hojarasca bajo el arbolado.
4. Modelos 10 al 13, el propagador principal son los restos de corta y operaciones silvícolas.

Los modelos pueden ser ajustados localmente de acuerdo a las experiencias de incendios y quemas de la zona. Por lo que el resultado del índice se presenta de 1 a 10 en 4 intervalos, desde un riesgo bajo (<2) a valores (>7) como extremos.

Para el cálculo del índice de riesgo local es necesario integrar el riesgo espacial, el índice de casualidad y el índice de combustibilidad. Así, el índice de riesgo local, que se supone como una multiplicación de estos tres índices haciendo que éstos se encuentren escalonados entre 1 y 10, da un valor resultando de 1 a 1.000 con el siguiente rango de riesgo bajo (<10), mediano (11 a 100), elevado (101-250) y muy elevado (>250). Esta información de acuerdo con el Mapa Militar de España se obtiene para una cuadrícula de 100 km<sup>2</sup> a escala 1:250.000.

El índice de carácter estructural debe ajustarse cuando se presentan cambios en las variables de entrada, como podrían ser lo son modelos de combustibles debido a tareas silvícolas, incendios forestales, etc. También los agentes causales pueden provocar estos cambios, razón por la que la DGCN considera reevaluar cada cuatro o cinco años las acciones preventivas y modificaciones de defensa.

De forma resumida se puede concluir que actualmente solamente se encuentra operando el Grado Meteorológico de Peligro y no el índice de riesgo local, del que por el momento se diseñan las pautas para su elaboración (Chuvienco *et al.*, 2004; Núñez Regueira *et al.*, 1999; 1999 a). En estos primeros pasos para el diseño de este nuevo índice de riesgo, y en los que estamos trabajando conjuntamente con el Grupo de investigación TERBIPROMAT, se emplean como variables principales pruebas calorimétricas para la determinación de capacidades energéticas, y ensayos de inflamabilidad de los combustibles para detectar su respuesta ante el inicio y propagación del incendio forestal.

### 2.3.2. Índices en América

Canadá y Estados Unidos, que elaboraron los primeros sistemas de predicción del continente Americano a principios de los años 20, han sido tomados como referencia en otros países del mundo.

El primer índice utilizado del que se tiene referencia data de los años 30, y se aplicó en Montana. Esta primera iniciativa provoca que se comiencen a generar más índices en otros estados, y que lejos de favorecer la prevención y lucha eficaz contra los incendios forestales, originó problemas de coordinación y de interpretación de los resultados a nivel nacional. Para resolver este problema entre 1959 y 1972 se desarrolla un sistema nacional, cuya aplicación se generaliza en 1973 mediante un Sistema Estadounidense de Peligro de Incendio o National Fire Danger Rating Systems (NFDRS) (Cohen *et al.*, 1985; Cohen, 1985; Deeming *et al.*, 1978; Chuvienco *et al.*, 2004).

Este índice evaluaba la probabilidad de que se produjese un incendio forestal en un momento determinado, y proporcionaba ciertas pautas sobre el posible desarrollo del mismo pero sin poder predecir cuál sería el comportamiento del fuego. Con la información recabada se planificaban a corto plazo las tareas de defensa contra los incendios.

El sistema estaba conformado por varios índices que evaluaban los distintos componentes de riesgo:

1. El índice de ocurrencia, que combinaba el riesgo asociado de origen humano, el riesgo asociado a la actividad tormentosa y el contenido de humedad del combustible.
2. El riesgo humano, basado en la casualidad provocada por el hombre, en el que influía la actividad diaria de cada causa de riesgo y los datos meteorológicos de los últimos cinco años.
3. El riesgo de la actividad tormentosa, fundamentado en información histórica con respecto a tormentas, fuegos causados por rayos y predicciones diarias de probabilidad de tormentas y rayos en la zona.

Además se consideraba el índice de combustión y mediante el cual se obtenían los componentes de propagación y de liberación de energía, dependiente de las características de humedad y estructura del combustible disponible (Chuvienco *et al.*, 2004). Este parámetro aportaba información importante sobre la dificultad de extinción del incendio en base a la velocidad de propagación, la estimación de la longitud de llama y la intensidad del frente de avance de incendio. Los componentes de la propagación se integran con el efecto de viento, la pendiente y propiedades del combustible como el componente de liberación de energía del mismo.

Otra valoración que se consideraba era el Índice de carga, que se obtenía de la combinación de los índices mencionados anteriormente y que se representaba en una escala de 0 a 100. Este índice pretendía valorar la dificultad que se presentaba en las labores de control y extinción de los incendios forestales en cierta área y periodo.

Por otro lado el Índice de severidad estacional pretendía realizar un pronóstico de trabajo total que se requería para el control de un incendio forestal en un cierto lugar y tiempo.

Para el año de 1988 el sistema NDFRS (Burgan, 1988) incorpora el índice de Byram (Keetch Byram, 1968), el cuál cuantifica los efectos de la sequía a largo plazo y modifica los modelos de humedad de los combustibles vivos, así como los 20 modelos de combustibles anteriores. En 1990 se incorporan por un lado el uso de imágenes de satélite con la finalidad de dar el seguimiento del estado de la vegetación viva (Burgan *et al.*, 1996; Burgan *et al.*, 1993), y por otro los datos meteorológicos obtenidos en la red de estaciones automatizadas (Chuvienco *et al.*, 2004).

Actualmente los gestores encargados de la lucha contra el fuego cuentan con el sistema WIMS (Wather Information Management System) con el que se obtiene información meteorológica y con el sistema NDFRS. Estos sistemas aseguran que durante la época de incendios cada medio día se introducen los datos de información meteorológica necesarios para predecir el peligro de incendio con una antelación de 24 horas.

La incorporación de internet ha permitido en los últimos años el desarrollo del sistema Wildland FIRE assessment Systems (WFAS). Este sistema ofrece diariamente el peligro de incendios para todo el país, y en el se incluyen el contenido de humedad del combustible vivo y muerto, el índice de sequía, el índice de Haines, y la información proporcionada por el sistema WIMS.

Como el sistema de peligro integrado NDFRS requiere para alcanzar el grado máximo de operatividad la información obtenida a partir de los datos meteorológicos e imágenes de satélite, sus gestores se basan principalmente en el índice de combustión. Esto hace que los módulos relativos a la probabilidad de incendios se encuentren menos desarrollados y su uso sea menor (Chuvienco *et al.*, 2004).

Desde 1970 Canadá comenzó a utilizar el sistema Canadian Forest FIRE Danger Rating Systems (CFFDRS). Este sistema, que está constituido por cuatro módulos, está operativo en la actualidad.

El Índice meteorológico (FIRE Weather Index, FWI) se obtiene a partir de las observaciones diarias de temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y precipitación. Con esta información se obtiene la condición de humedad de los combustibles, y con información del viento se obtiene la probabilidad de inicio y comportamiento del incendio. Este índice es el más empleado para fines de peligro de incendio.

El sistema de predicción del comportamiento del fuego (FIRE Behavior Prediction, FBP) se obtiene a partir de la información de los modelos de combustibles, datos meteorológicos, topografía y contenido de humedad, proporciona valiosa información acerca de la intensidad y propagación del fuego. Para complementar esta información se recurre a datos de velocidad, combustibles quemado, intensidad del fuego, crecimiento del perímetro o posibilidad de inicio de fuego en copa (Hirsch, 1996; Chuvienco *et al.*, 2004).

Con lo que respecta a la predicción de la ocurrencia, Fire ocurrence prediction (FOP), su base principal para determinar la casualidad de incendios se centra en aquellos ocasionados por origen humano o natural "rayos". Este índice se encuentra aún en fase de desarrollo y se realizan varios experimentos para predecir números de incendios de origen anual o de origen humano.

Un sistema accesorio que aún se encuentra en desarrollo es la humedad del combustible (Accesory Fuel Moisture System, AFMS). En este nuevo sistema podría complementar a los índices anteriores implementando diferentes variables identificadas por medio de códigos específicos la humedad del combustible en las características del paisaje, la latitud, la estación del año, la hora del día, etc. Este sistema todavía está en desarrollo.

Por lo anterior se concluye que el sistema canadiense incorpora variables meteorológicas, época del año, topografía y contenido de humedad de los combustibles y actividad de los agentes causales con la finalidad de evaluar el peligro de que se produzcan los incendios forestales y las características de propagación en el caso de presentarse.

Además el servicio Canadiense ha creado un sistema informático para la distribución de la información (Canadian Wildland Fire Information Systems, CWFIS) (Lee, 1995; Chuvienco *et al.*, 2004).

### 2.3.3. Índices utilizados en México

En México, y más concretamente en Pueblo Nuevo (Durango, en el extremo NO de la zona interior de la República de México), se han desarrollado y aplicado algunos modelos para caracterizar y determinar los combustibles forestales, y poder calcular el índice de peligro de incendios forestales. En este modelo, y tomando como base los índices de peligro de incendios forestales, se integraron los índices causales y meteorológicos con la finalidad de generar estrategias de manejo de combustibles forestales. Así, tenemos que los:

1. Modelos de índices meteorológicos fueron obtenidos a partir de las diferentes variables climáticas. Para la determinación de los índices meteorológicos se consideraron los promedios mensuales de la temperatura máxima y la precipitación total como variables espaciales para el modelo meteorológico. Los registros con que se contaron por parte de la Comisión Nacional del Agua (CNA) son desde 1965 al 2002. Con esta información se realizó una regresión lineal múltiple con el propósito de interpolar los resultados de dicha área.
2. Índices de combustibles obtenidos mediante un inventario. Su determinación se realiza mediante la metodología propuesta por Brown (Brown, 1982) realizando un muestreo considerando la información de 100 líneas de muestreo de 20 m tomando como base el inventario de combustibles, y determinar así carga de combustibles por rodal.
3. Índices causales en función de poblados, caminos, cercanías y áreas de corta. Los índices causales de incendio forestal son ocasionados por la intervención de la actividad humana. En el cálculo de estos se consideran las distancias a las localidades, caminos, áreas de corta en rodales de aprovechamiento, áreas donde se realizan quemas de tipo agropecuario.

Con la recopilación de la información de todos estos índices anteriormente mencionados se procede a obtener el índice de peligro de incendio forestal (IPI) mediante una evaluación multicriterio (EMC). De los resultados obtenidos del EMC podemos deducir que el índice de peligro de incendio forestal, y en donde el mayor valor fue asignado al índice meteorológico, contribuye de forma global a la mitad del índice de peligro de incendio. Por lo tanto, la conclusión general de la aplicación de este método es que los periodos de mayor riesgo van de Febrero a Mayo, meses con muy baja precipitación, mayor temperatura, y los de menor riesgo van de Julio a Septiembre, y que coinciden con los periodos de lluvias. Los índices de combustibles y causales obtuvieron el mismo nivel. Por lo que elaboraron 12 modelos de índice de peligro de incendio forestal, uno para cada mes del año, estableciendo luego seis clases de peligro: 1 Muy bajo, 2 Bajo, 3 Medio, 4 Alto, 5 Muy alto y 6 Extremo.

De la aplicación de estos modelos se determinó que los índices de combustibles de mayor importancia en cuanto a peligrosidad son la hojarasca y su espesor, y los combustibles ligeros, siendo los combustibles pesados aquellos con menor peligrosidad. Por otro lado los índices causales de mayor impacto resultaron en áreas de quemas agrícolas, seguidas por aquellas cercanas a caminos y a barrancas. Los índices de peligro de incendios presentaron valores más elevados durante los meses de Febrero a Mayo con grados medio, alto y muy alto, mientras que los valores bajos coincidían con los periodos de lluvias. Esto demuestra que el índice de peligro de incendio está altamente influenciado por el índice meteorológico (Rentería *et al.*, 2005).

Otras herramientas que se han empleado en el estado de Chihuahua para localizar áreas potencialmente peligrosas se han desarrollado a partir de modelos cartográficos de peligro de incendio. En ellos se ha analizado como influye en el grado de peligro la susceptibilidad de la vegetación considerando el tipo y cantidad de combustible. Para ello, y cuando se trata de superficies grandes, es necesario obtener un inventario de combustibles. Para ello se ha recurrido a una clasificación de la vegetación al fuego en base a su vulnerabilidad mediante el uso de información geográfica. Las variables meteorológicas, especialmente la temperatura y la humedad relativa, y con las cuáles se realiza un análisis de interpolación espacial, son claves en el desarrollo de modelos cartográficos de peligro de incendio. Las principales variables topográficas que se consideraron son la exposición y la pendiente orientadas al sur o suroeste. Mediante modelos digitales de pendientes y de orientación de pendientes en combinación con modelos de elevación se generaron las variables topográficas. Con estas variables se realiza un análisis de evaluación de multicriterio con la que se obtiene un:

1. Componente meteorológico a partir de variables de temperatura, humedad relativa, viento y orientación de la pendiente.
2. Componente de causa en donde se incluyeron rasgos socioeconómicos y un análisis de distancias.
3. Componente de susceptibilidad de la vegetación natural.
4. Componente de daño potencial considerando existencias volumétricas de madera, valor comercial de las mismas, áreas naturales protegidas y la cercanía entre poblados y áreas forestales.

Como resultado de la integración de estos componentes se diseñó un modelo de peligro, y que se está a aplicar en la actualidad (<http://www.estrucplan.com.ar/Producciones/entrega.asp?IdEntrega=1434>; Muñoz *et al.*, 2005) con un éxito relativo.

### 2.3.4. Detección de incendios forestales en México

Como se mencionó anteriormente (Anónimo, 1928), los datos de aportados tanto por las primeras torres de observación para la detección de incendios forestales en el cerro Rumurachic (Chihuahua), como las 32 torres que operan en la actualidad, fueron utilizados para realizar un análisis de la cobertura vegetal visual de esta zona. Estos datos, apoyados por el inventario forestal, fueron básicos para determinar los tipos de vegetación del estado. Para ello se utilizó un modelo digital de elevación al cuál se le aplicó la técnica de "función de observadores simultáneos" con criterios de altitud sobre el nivel del mar y cobertura de visualización máxima permitido de 360°. La zona en donde se llevó a cabo el estudio está localizada en una porción de la sierra madre occidental del Estado. Esta zona presenta unas peculiaridades climáticas y de vegetación características con un clima templado, lluvias en verano (Cf) y una abundancia de la vegetación de pino, encino, selva baja y vegetación halófito. Con la visualización realizada se obtuvo que la relación de la superficie cubierta para el análisis de visibilidad sobre la superficie forestal bajo protección solamente es eficiente en un 42,94 %, frente al 80 % que recomiendan habitualmente los modelos de predicción. Por lo tanto, el 57,06 % restante, y que no es directamente visible por los observadores, queda fuera de los rangos de protección. En este caso particular, esta falta de cobertura no es preocupante si se considera la basta extensión forestal y el relieve del terreno. Quizás pueda ser más preocupante en el caso de la selva en donde se encontró una ineficiencia más alta debido a que en esta zona se localizan en caídas y barrancas que oscilan entre los 500 y 1800 metros de altitud.

La visibilidad para el bosque de pino y encino correspondió a un 39,58 %, por lo que se debe tener una cobertura visual por el vigía de 3.315.360 hectáreas que representa el 40,50 % de la superficie total. Este estudio permite en la actualidad:

1. Proponer reubicar las torres que tienen una gran vecindad.
2. Concluir que las torres actuales son insuficientes.
3. Diseñar una nueva red de puntos de observación que cubra al menos un 80 % del total de la región mediante la aplicación de instrumentos de modelación matemática y de análisis marginal (Pompa *et al.*, 2005).

Además, y debido a que el Estado de Chihuahua se encuentra entre primeros lugares de producción maderable en México a la vez de ser uno de los estados en los que registra mayores ocurrencias de incendios, se han realizado otras investigaciones para la detección de áreas incendiadas y la valoración de pérdidas económicas. Para ello se recurre al procesamiento digital de imágenes de satélite Landsat 5 TM con la finalidad de identificar y cuantificar las áreas afectadas por incendios. En esta región con un clima templado, la metodología utilizada se basa en la adquisición de imágenes antes y después de la temporada de incendios forestales ocurridos en el año 2003. Para ello se empleó un análisis basado en el cálculo del Cociente Normalizado de Áreas Incendiadas (Normalizad Burn Ratio NBR) con índice diferencial dNBR entre imágenes. Así se pudieron detectar cambios ocurridos en la superficie forestal por efecto del fuego. Las áreas fueron digitalizadas e incorporadas a un sistema de información geográfica con la finalidad de determinar áreas incendiadas, verificar en campo los resultados, y registrar tanto los incendios reportados por la Comisión Nacional Forestal, como los puntos de calor de la Comisión Nacional para uso de la Biodiversidad provenientes de sensores AVHRR y MODIS respectivamente. Sobre el impacto económico de los daños causados por los incendios se llevó a cabo una valoración confrontando especialmente los polígonos, por lo que el costo de metros cúbico de madera se valoró en 350 \$, ya que como no se cuenta con la superficie forestal, no es posible determinar este impacto económico. El resultado obtenido de los valores de dNBR que discriminan áreas afectadas por el fuego oscila entre 0,4 y 1,3. A partir de estos valores se obtuvieron 452 polígonos y de ellos 387 fueron interpretados de manera correcta. Por lo que la probabilidad estimada del 95 % de fiabilidad de la interpretación queda reducida entre un 83,96 y un 87,26 de precisión real. La superficie afectada fue de 8.700 hectáreas de las cuáles el 48 % corresponden a bosques de pino-encino, 22 % a bosques de encino, 11 % a bosques de pino, y el resto, un 19 %, a pastizal. Se concluye que el procedimiento metodológico es notablemente eficientemente y que la cartografía diaria de peligro de incendio es de gran utilidad para el diseño de las actividades de control y combate de incendios a nivel regional (Núñez *et al.*, 2005).

Desde el punto de vista de la detección de los incendios forestales se ha logrado realizar un análisis de los patrones de la distribución espacial, en la que se realizaron observaciones puntuales describiendo las distancias relativas entre las mismas. Estos patrones pueden presentar una distribución espacial conocida como aleatoria, en base a agrupaciones y uniformidad, poniendo de manifiesto que existen procesos ambientales responsables de la generación de un cierto patrón tipo a seguir en la aparición de los incendios forestales. Para ello se ha empleado la función estadística *K* de Ripley para describir este patrón de distribución de incendios forestales en el estado de Chihuahua desde el año 1999 al 2005. Para ello fue necesario contar con información geográfica y los resultados mensuales de la región de los puntos de calor de la CONABIO.

Estos datos se relacionaron con las condiciones topográficas, climáticas (precipitación y temperatura máxima), del sitio (vegetación) y distancia de caminos cercanos y poblados donde ocurrieron los puntos de calor. Los resultados obtenidos mostraron un patrón de agrupación de puntos de calor en ciertas zonas estableciendo una estrecha relación entre los puntos de calor y la precipitación. Por lo tanto se puede concluir que los patrones de distribución espacial de puntos de calor y su relación con variables ambientales son buenos, y que una vez definida esta variable es posible integrar un modelo de riesgo de incendio en el estado de Chihuahua (Muñoz (a) *et al.*, 2005).

En lo referente al combate de incendios forestales en la Sierra de La Primavera, el Ing. Karl Augustin Grellmann<sup>†</sup> fundador de actual Departamento de Madera, Celulosa y Papel (Hernández <sup>†</sup>, *et al.*, 2005), creó la primera cuadrilla de guardabosques en el año de 1984. Esta cuadrilla estaba conformada por profesores, administrativos y estudiantes de la Universidad de Guadalajara.

### **2.3.5. Causas e Importancia Ecológica del fuego**

Desde un punto de vista ecológico los incendios forestales afectan directa o indirectamente a componentes de los ecosistemas tales como la vegetación, la fauna silvestre, el suelo a diferentes niveles, agua y aire, modificando además el microclima y régimen hidrológico (Rodríguez, 1994).

El factor ecológico del fuego, cuando se origina causas naturales en los ecosistemas forestales, depende de su frecuencia promedio, variación, tipo, intensidad, extensión, regularidad o irregularidad de afectación de incendio forestal y época del año que se presenta. Pero cuando estos incendios son de origen humano, se establecen términos de regímenes píricos (Rodríguez, 1994).

La ecología del fuego en los diferentes tipos de ecosistemas tiene una gran importancia de acuerdo al impacto adverso a la vegetación, sobre todo aquellos parámetros relacionados con la intensidad y frecuencia. Por ejemplo, en el bosque tropical subcaducifolio la delgadez de la corteza de los árboles en este ecosistema los hace más susceptibles a las llamas (Rodríguez, 1994).

La frecuencia de los incendios en los últimos años ya comenzó a rebasar la tolerancia de los ecosistemas forestales y por consiguiente la degradación de los mismos, fenómeno que hoy alcanza su mayor intensidad (Rodríguez, 1994).

El fuego es de gran importancia en la sucesión ecológica, en la que puede reiniciar una sucesión secundaria o contribuir a un determinado estado seral (disclimax debido al fuego, o bien al clímax pírico o asociaciones secundarias mantenidas por el fuego). Esta relación entre fuego y ecosistema forestal se reproduce en todo el planeta (Rodríguez, 1994).

Así podemos entender los ecosistemas forestales de los pinares en el mundo como etapas sucesionales intermedias que se deben en gran medida su permanencia a los procesos desencadenados por los incendios y al manejo forestal. Un ejemplo claro en México son las masas de *Pinus patula* en el estado de Puebla y *Pinus cooperi* en el estado de Durango, donde la presencia de incendios forestales facilita este tipo de ecosistemas frente a las masas de encino que necesitan ambientes más sombríos, y que pueden llegar a ser una etapa sucesional siguiente a la de pino si se dan las condiciones adecuadas. En este tipo de ecosistemas, la frecuencia de incendios favorece en gran medida la eliminación del pino y la proliferación de otras especies más adaptadas como zacates y algunos otros pastizales con bajo valor forrajero (Rodríguez, 1994).

Por tal razón se reconocen tres regímenes píricos: incendios catastróficos poco frecuentes, incendios poco intensos y frecuentes, e incendios catastróficos frecuentes (Barney *et al.*, 1984).

Las especies vegetales han desarrollado mecanismos de defensa diversos en forma de adaptaciones ante el factor ecológico del fuego, entre las que destacan prevención del daño, recuperación del daño ocasionado por las llamas, recolonización de áreas quemadas, o la facilitación de incendios en la localidad (Rodríguez, 1994).

El producto de la combustión en los incendios, y que genera una gran cantidad de humo, contiene una diversidad de compuestos químicos entre los que podemos mencionar NO, SO, CO y otros más, produciendo además CO<sub>2</sub>, compuesto que contribuye fuertemente al cambio global climático. Esto hace que el programa del medio ambiente de las Naciones Unidas (PNUMA, 1988) mencione a los incendios forestales como responsables directos del 20 o 25 % de las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera. Esto favorece el efecto de invernadero, representando estos fenómenos naturales en 1992 el 50 % de las emisiones de este gas (Rodríguez, 1994). Sobre lo anteriormente señalado se establece que el humo de los incendios forestales en el Distrito Federal contienen un promedio de 37.000 toneladas de CO<sub>2</sub> anualmente, por lo que a nivel nacional se incrementa en 2.821.500 toneladas.

### **2.3.6. Normas y Reglamentos**

La vigente norma oficial en México, NOM-015 SEMARNAP/SAGAR-1997, regula el uso del fuego en terrenos forestales y agropecuarios. En ella se menciona que la prevención de incendios forestales son medidas y actividades tendientes a evitar que se presente el fuego en áreas forestales y que cuando éste ocurra, limite y controle su propagación. Para las actividades de prevención menciona las siguientes acciones: apertura de guardarrayas en zonas de alto riesgo, limpieza y control de material combustible y organización, integración y participación en brigadas preventivas.

El Programa Nacional Forestal SEMARNAT 2001 para los incendios forestales tiene como objetivos disminuir el número de incendios y la superficie afectada favoreciendo los procesos de la prevención y mejorando la eficiencia, eficacia del combate y control de incendios. Dentro de las estrategias se encuentra fortalecer la prevención atendiendo primordialmente las causas que originan la mayor incidencia por la intervención humana. En algunas líneas de acción son destinar más recursos para las tareas preventivas y optimizar usos de información CONABIO para la detección de puntos de calor vía satélite.

Podemos concluir que en México no existen los procedimientos adecuados en la cuestión preventiva de incendios forestales, ya que hay grandes deficiencias y retrasos en acciones y procedimientos reales, por lo que es necesario considerar en las actividades preventivas la implementación de variables directamente relacionada a cada una de las especies forestales. Entre algunas de ellas podemos mencionar la inflamabilidad, poderes caloríficos, evaluación de combustibles, uso de tecnología de sistemas de información geográfica e imágenes de satélite para crear mapas de riesgo de incendios forestales. En otros países ya existen programas preventivos que recogen algunas de estas variables. Podemos mencionar el plan Nacional de manejo de fuego en Argentina, Francia, o España entre otros. Sobre la detección de puntos de calor se puede decir que presenta una serie de problemas como los son la detección de incendios en el momento oportuno por la diferencia en tiempo del paso de los satélites y una buena coordinación de las diferentes dependencias.

La Sierra de la Primavera cuenta con una superficie total de 36.000 ha de las cuales 30.500 ha se encuentran bajo decreto Federal como área de protección para flora y fauna.

Anualmente se presentan una gran cantidad de incendios, y en los últimos 8 o 10 años se presentan incendios de gran intensidad lo que ha provocado la pérdida de especies de gran importancia ecológica. Sobre las superficies afectadas no coinciden las actuaciones Municipales, Estatales y Federales, dificultando mucho su prevención y extinción.

Otro punto a considerar dentro de la norma NOM 015 es que para la reducción de combustibles mediante quemas prescritas éstas deben ser notificadas por la SEMARNAT. Además, dentro de la misma no están considerados aspectos meteorológicos, tipo de vegetación, calidad y cantidad de combustibles. Por lo que dentro de la quema debería considerarse información referente al comportamiento del fuego como la velocidad de propagación y altura de llama, fundamental para determinar el riesgo y peligro del fuego. Además no se tiene una base de datos en los que se involucren sistemas de información geográfica para cada región (Flores *et al.*, 2005).

Por lo tanto, este trabajo pretende aportar herramientas innovadoras y dinámicas para desarrollar un programa de preventivo de incendios forestales en México mediante una nueva tecnología en la que se tratan de forma integrada variables como el poder calorífico, inflamabilidad, composición química, e información meteorológica.

### **2.3.7. Variables físico-químicas de combustibles forestales**

Para poder emplear variables físico-químicas en la prevención de incendios forestales, y determinar valores calorimétricos correspondientes a los combustibles forestales, es necesario definir algunos términos como son temperatura, calor, caloría, capacidad térmica, calor específico, poder calorífico superior (PCS) e inferior (PCI).

#### 2.3.7.1. Definiciones de variables

La **temperatura** físicamente es una magnitud escalar que expresa el grado o nivel de calor de los cuerpos o del ambiente, y que para su definición recurrimos a una escala de medición que no tiene un nivel máximo, sino un nivel mínimo conocido como el cero absoluto (Harvey, 1968). Teniendo en cuenta la ley de la teoría cinética de la materia, los diferentes átomos que constituyen todas las sustancias se encuentran en un rápido movimiento y cuando éstas elevan su temperatura, ese movimiento atómico aumenta y el sistema se dilata. Por el contrario, cuando un cuerpo se enfría el movimiento atómico disminuye y el cuerpo se contrae (Harvey, 1968).

Se define la caloría como la cantidad de energía calorífica necesaria para elevar la temperatura de un gramo de agua destilada de 14,5 °C a 15,5 °C a una presión estándar de una atmósfera. El número de calorías necesarias para elevar 1 °C la temperatura de 1 gramo de sustancia se define como capacidad térmica o capacidad calorífica (Harvey, 1968).

En el caso que nos ocupa, el **poder calorífico** es la energía contenida en una unidad de masa de combustible en cada especie forestal, y que se desprende al producirse una reacción donde se produce la ruptura del esqueleto carbonado de un compuesto cuando se quema en atmósfera oxidante, generalmente oxígeno o fluor en fase gaseosa. Si la experiencia calorimétrica se realiza en condiciones perfectamente definidas, puede calcularse la variación de la energía que se produce en la misma. El conocimiento de esta cantidad nos proporciona información sobre la magnitud y virulencia que el fuego va a presentar (Núñez *et al.*, 1999 (a); Núñez *et al.*, 2000 (a)). Esto depende de dos factores: la naturaleza del combustible y el contenido de humedad, el cual varía en función de las condiciones bioclimáticas del área, especialmente de la cantidad de lluvias y temperatura. El diseño de las reforestaciones se lleva a cabo teniendo en cuenta el valor energético obtenido, creándose franjas con árboles de bajo poder calorífico e inflamabilidad que actúan como cortafuego natural (Núñez *et al.*, 1999 (a)), previniendo incendios forestales o, en caso de haberlos, reduciendo su propagación.

Los parámetros termoquímicos dependen de la naturaleza del combustible de las especies forestales, la naturaleza de los gases volátiles originados durante su combustión, la superficie natural vegetal y la humedad contenida tanto en el interior del material como en el ambiente (Núñez *et al.*, 1999).

Uno de los métodos más comunes usados para determinar el calor o flujo de energía que se desprende en la combustión de una muestra, consiste en medir la elevación de temperatura que sufre una masa de agua contenida en un recipiente de volumen constante que no deje escapar el calor utilizando un calorímetro de bomba (Núñez *et al.*, 1999).

El poder calorífico superior de la madera (PCS) es el valor obtenido de la combustión completa es decir, con un aporte de oxígeno en exceso por lo que no existirán cenizas y el calor medido será el más alto posible ya que no hay intercambio de calor con el exterior (Elvira *et al.*, 1989).

Otro parámetro de interés es el poder calorífico superior (PCS), que es la cantidad de calor generado en la combustión completa en una bomba calorimétrica por unidad de masa de muestra en una atmósfera de oxígeno, teniendo en cuenta el agua contenida en la muestra (humedad) y la generada de la combinación de hidrógeno que permanece en forma líquida (Núñez *et al.*, 1999; Núñez *et al.*, 2000 (a); Núñez *et al.*, 2002 (a)). Si se asume que el agua y los productos que permanecen en forma de vapor, el poder calorífico inferior (PCI) puede ser calculado (Núñez *et al.*, 1999) a través del PCS y entonces el agua y el resto de los productos de combustión se encuentran en forma de vapor (Núñez *et al.*, 2002 (a)).

Los productos finales de la combustión son O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> y N<sub>2</sub> en fase de gas junto con agua que está contenida en la muestra, y que se genera a partir del contenido de hidrógeno, en forma líquida (Núñez *et al.*, 2000 (b); 2001).

Según Núñez *et al.*, el poder calorífico superior puede ser determinado en el laboratorio, siendo de especial interés ya que es uno de los parámetros principales en el cálculo de índices de riesgo los cuales dependerán de las especies forestales, zonas y la estación del año (Núñez *et al.*, 2000 (b)). El poder calorífico inferior (PCI) es la energía generada en el proceso de combustión menos el calor de evaporación del agua existente en una muestra determinada (Elvira *et al.*, 1989). Otro término empleado es poder calorífico inferior (PCI), que puede ser calculado a partir del PCS, asumiendo que el agua en los restos de la combustión está en forma de vapor (Núñez *et al.*, 2000 (a)).

El poder calorífico práctico (PCP) es aquel que realmente se obtiene de una muestra de madera determinada. Este valor no puede medirse de manera directa, pero sí es posible calcularlo mediante el PCI restándole a éste el calor de las cenizas, el cuál variará en cada combustión (Elvira *et al.*, 1989).

El conocimiento del PCI nos proporciona información sobre la magnitud del fuego y puede cuantificarse como el índice de propagación en superficies vecinas y la virulencia potencial de los incendios (Núñez *et al.*, 2000 (b)).

El poder calorífico superior está muy ligado a la lignificación de los tejidos y las variaciones de una misma especie según su procedencia. El poder calorífico se determina usando una bomba calorimétrica y viene expresado generalmente en calorías por gramo de materia seca (Hernando, 1989).

El poder calorífico de la lignina es mucho mayor que el de la celulosa. Las acículas y hojas jóvenes son muy ricos en celulosa y presentan valores inferiores a los de las hojas viejas, en las cuales los tejidos están enriquecidos en lignina por el engrosamiento de la pared celular. Las especies con altos contenidos de volátiles presentan una curva especial en la evolución del poder calorífico (Hernando, 1989).

Los incendios forestales son los principales responsables de desastres económicos y ecológicos de los recursos del bosque en todo el mundo (Núñez *et al.*, 2001). Las altas temperaturas que generan los incendios varían considerablemente dependiendo de la carga del combustible y de las condiciones en que se presenta la quema. Si existe una gran cantidad de combustibles las temperaturas en el suelo pueden permanecer elevadas varias horas ocasionando daños al suelo (DeBano, 1991).

Existen otras investigaciones referentes al uso del poder calorífico superior en biomasa vegetal cuya finalidad es la de no cometer errores significativos en la medida del poder calorífico superior (PCS en adelante) mediante ensayos en un calorímetro que sean independientes del tamaño de muestra y del contenido en nitrógeno y azufre (Suárez *et al.*, 1999). Uno de los problemas que surge está relacionado con el peso de las pastillas, que debe ser inferior a 1 gramo, por lo que se debe conocer la corrección del azufre y ácido nítrico. Por este motivo, se evaluaron estas variables mediante un diseño factorial utilizando tres factores a dos niveles distintos cada uno de ellos. Se empleó una bomba calorimétrica para determinar PCS y siguiendo la norma ASTM D2015. Cuando se trabaja con compuestos de poca densidad y que son muy voluminosos, cuando la muestra es de 1 gramo es difícil introducirla en la cápsula de ensayo, además de difícil de preparar lo que produce una combustión imperfecta. Por ello se recomienda que las pastillas sean molidas y compactadas con un peso del material menor a 1 gramo. En el interior de la bomba y debido a la alta presión, el nitrógeno se oxida a óxido nítrico  $N_2O_5$  y con la combinación con el agua se transforma en ácido nítrico  $HNO_3$ . Este proceso lleva asociado un calor de formación de  $14,4 \text{ kcal mol}^{-1}$  y para conocer la corrección del ácido, posteriormente a la combustión debe valorarse el líquido de lavado de la bomba con un alcalí  $Na_2CO_3$  al 0,0709 N. Para ello es necesario conocer el contenido de nitrógeno de la muestra y transformarlo a calorías. En el caso de la determinación del contenido en azufre, la muestra se oxida en anhídrido sulfúrico  $SO_3$  y se transforma en ácido sulfúrico  $H_2SO_4$  con un desprendimiento de calor de  $72,2 \text{ kcal mol}^{-1}$ .

Dado que los contenidos de nitrógeno y de azufre suelen ser muy pequeños (el contenido de nitrógeno menor al 1 % y el de azufre menor al 0,1 %), no se llevará a cabo la valoración posterior a la combustión para determinar el PCS de la biomasa, pues la norma no exige el empleo de estas correcciones para contenidos tan pequeños.

Se realizó un diseño factorial del tipo  $2^3$  en el que, de acuerdo a los resultados, se aplicaron un análisis de varianza y una prueba de F.

Se trabajó con una bomba PARR 1261 en modo de operación isoperibol, el cual cuenta con un microprocesador que compara continuamente el incremento de temperatura con una curva base estimándose la temperatura final sin llegar a alcanzarla. El material empleado fue lúpulo (conos sin triturar) que presenta menor densidad. Los factores estudiados son el peso de la muestra con nivel inferior y superior, el contenido de azufre con nivel inferior y superior y el contenido de nitrógeno con nivel inferior y superior. El material se procesó con una molienda de partícula de 3 mm para elaborar pastillas más homogéneas. Dentro de los resultados se establecieron:

1. Que el peso de la pastilla de muestra consistió en 0,3 g (de 0,2 g a 0,5 g), dando lugar a un aumento en la respuesta de  $10,69 \text{ cal g}^{-1}$ .
2. El incremento de contenido en nitrógeno de los niveles de 0,2 % a 1 % independiente del nivel de las otras variables reduce la respuesta en  $8,06 \text{ cal g}^{-1}$ .
3. Asimismo el incremento de azufre en la muestra de 0,02 % a 0,1 % produce una reducción de  $1,81 \text{ cal g}^{-1}$ .

El efecto de variación de cualquiera de estos tres factores a los niveles prefijados no es significativo considerando su desviación típica de  $44,45 \text{ cal g}^{-1}$ . No se tienen evidencias de un efecto real de los tres factores estudiados sobre la respuesta, por lo que se concluye que la pastilla tipo de 0,3 g consiguió incrementar el poder calorífico en  $10,69 \text{ cal g}^{-1}$  que es un efecto no significativo.

Entre las réplicas, a pesar de presentarse diferencias entre pesos, el resultado del poder calorífico superior no presenta una variación significativa. La consideración de un error de 0,8 % dio lugar a una variación del poder calorífico de  $8,06 \text{ cal g}^{-1}$  presentando un resultado no significativo. A su vez, el error del azufre con 0,8 % varió el poder calorífico en  $1,80 \text{ cal g}^{-1}$ , efecto menor al detectado con variación de peso de la muestra. Por lo tanto ninguno de los tres factores provoca interacción entre sí. La mayor diferencia entre los ensayos se detectó cuando la homogeneidad de la muestra no era perfecta, por lo que es preciso un picado previo del material y una mezcla homogénea del mismo para la pastilla tipo, con un volumen que permita una correcta combustión. Los resultados obtenidos son aplicables para todas aquellas biomásas lignocelulósicas cuyos contenidos de ácido nítrico y óxidos de azufre estén entre los niveles estudiados y no para otros combustibles hidrocarbonatos.

Otra de las variables utilizadas en la creación de programas preventivos de riesgo de incendios forestales es la inflamabilidad, que es la resistencia de las especies a controlar y propagar el fuego, la cual depende de la naturaleza de los combustibles y el nivel de humedad, ambos controlados por el material y el ambiente. Esto es factor clave para plantear estrategias para la extinción de incendios forestales (Núñez *et al.*, 1999 (a); Núñez *et al.*, 2001).

Según los valores calorimétricos e inflamabilidad de cada una de las especies forestales, es posible clasificar éstas en términos de su contenido de energía y su resistencia a incendios. Esta clasificación es útil para diseñar mapas energéticos realistas (Núñez *et al.*, 1999 (a)). Para abordar el tema se comentará a continuación la importancia de la aplicación de la calorimetría en sus distintos trabajos y usos.

Desde 1989 Hernando estudió la inflamabilidad y el poder calorífico de las principales especies de sotobosque en España, realizando colectas desde 1984 en zona centro oeste, 1985 en zona Levante y 1986 en Cádiz. Las observaciones consideradas son condiciones microclimáticas, estado fenológico, condiciones edáficas y topografía. La toma de la muestra consistió en cortar extremos de las ramillas laterales y terminales de varios individuos en el mismo estado fenológico. El material se guardó en bolsas herméticas para reducir la pérdida de humedad. Posteriormente se secó en una estufa a  $(100 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C})$  hasta alcanzar un peso constante. Una vez secas, se molieron y procesaron en una prensa de mano para realizar una pastilla de 1 gramo. Para tallos duros lignificados se utilizó el material seco fraccionado en porciones de 2 cm. Una vez pesado, se introdujo en la bomba con oxígeno a una presión de  $2.461,6 \text{ kN m}^{-2}$  (24,52 bar) para asegurar una combustión completa. La bomba se colocó en un calorímetro adiabático. Para cada especie se realizaron dos repeticiones y para los casos en los que el resultado presentara una diferencia de  $38,37 \text{ cal g}^{-1}$  se realizó otra repetición. Para la determinación del poder calorífico superior hubiera sido más exacto no secar las muestras previamente; para especies resinosas y aromáticas los valores obtenidos son inferiores a los reales. Para homogeneizar el ensayo y facilitar la comparación de resultados es más práctico trabajar con material anhidro. Para el análisis se realizó un análisis factorial considerando el poder calorífico de las diferentes especies, zona de muestreo (3) y época de colecta (4). Se clasificó de acuerdo a Hough (1969), pero se realizó una modificación añadiendo otra nueva clase (Clase 5) para una mejor clasificación entre las especies como se observa en la Tabla 1.

Clases	Rangos en $\text{kcal kg}^{-1}$
Clase 1	$<4.000 \text{ kcal kg}^{-1}$
Clase 2	$4.000-4.500 \text{ kcal kg}^{-1}$
Clase 3	$4.500-5.000 \text{ kcal kg}^{-1}$
Clase 4	$5.000-5.500 \text{ kcal kg}^{-1}$
Clase 5	$>5.500 \text{ kcal kg}^{-1}$

Tabla 1. Clasificación del poder calorífico según Hernando.

Las especies evaluadas presentaron los siguientes rangos de poder calorífico ( $\text{kcal kg}^{-1}$ ) y se reportan los géneros *Eucalyptus camaldulensis* (hoja y corteza) ( $4.804 \text{ kcal kg}^{-1}$  y  $3.780 \text{ kcal kg}^{-1}$ ), *Pinus pinea* (para conos y sustrato seco de  $4.629 \text{ kcal kg}^{-1}$  a  $4.805 \text{ kcal kg}^{-1}$  y  $4.725 \text{ kcal kg}^{-1}$  a  $4.961 \text{ kcal kg}^{-1}$ , respectivamente), *Quercus coccifera* ( $4.680 \text{ kcal kg}^{-1}$  a  $5.033 \text{ kcal kg}^{-1}$ ), hojas de *Q. ilex* ( $4.893 \text{ kcal kg}^{-1}$ ), *Q. labis* L. ( $4.893 \text{ kcal kg}^{-1}$ ), *Q. pedunculata* Ehr ( $4.451 \text{ kcal kg}^{-1}$ ), *Q. virginiana* Mill ( $4.708 \text{ kcal kg}^{-1}$ ), acículas de *Pinus halepensis* Mill ( $5.277 \text{ kcal kg}^{-1}$ ), *P. banksiana* ( $5.102 \text{ kcal kg}^{-1}$ ), acículas jóvenes de *P. clauca* Vasey ( $4.865 \text{ kcal kg}^{-1}$ ), *P. cembroides* L. ( $5.000 \text{ kcal kg}^{-1}$ ), *P. contorta* Dougl ( $5.120 \text{ kcal kg}^{-1}$ ), *P. ellioti* ( $5.206 \text{ kcal kg}^{-1}$ ) y cubierta muerta de *P. pinea* ( $4.485 \text{ kcal kg}^{-1}$  a  $5.061 \text{ kcal kg}^{-1}$ ), entre otros. En el trabajo se concluye que la única manera de obtener valores exactos es mediante ensayos directos. Las especies mediterráneas presentan poder calorífico superior más elevado que otras especies localizadas en zonas más frías; en consecuencia se requirió otra clase (5). Se observa una alta correlación entre la especie y la época del año, presentándose los máximos valores del poder calorífico en las épocas de reposo vegetativo y los mínimos en la época de crecimiento y formación de los tejidos. La excepción es *Quercus ilex* L., que presenta un mínimo en Agosto y la *Calluna vulgaris* (L.) que lo presenta en Diciembre. En el tratamiento estadístico no resultó significativo el efecto "zona" debido a que se consideraron zonas muy próximas y similares; el poder calorífico superior presenta valores diferentes en cada una de las zonas y una evolución muy similar debido a los factores climáticos.

Elvira *et al.* (1989) evaluaron la inflamabilidad y energía de las especies de sotobosque en un estudio piloto con aplicación a incendios forestales, abordando el problema con definiciones y procedimientos algebraicos sobre el poder calorífico superior (PCS), poder calorífico inferior (PCI) y poder calorífico práctico (PCP). Emplearon la metodología de poder calorífico superior de especies españolas mediante ensayos de la norma UNE-23-103-73 que se corresponde con la NF-M-03-005 y con la ISO-1716 mediante bomba calorimétrica adiabática. Además reportaron los poderes caloríficos de diversas especies y compuestos afines y combustibles diversos proporcionados por diferentes autores. Entre ellos podemos mencionar algunos como *Eucalyptus globulus* Labill. ( $4.778 \text{ kcal kg}^{-1}$ ); *Pinus halepensis* Mill. (acículas) ( $5.277 \text{ kcal kg}^{-1}$ ); *Quercus ilex* L. (hojas) ( $4.815 \text{ kcal kg}^{-1}$ ); *Q. labis* L (hojas) ( $4.893 \text{ kcal kg}^{-1}$ ), *Q. obtusiloba* L. ( $4.882 \text{ kcal kg}^{-1}$ ); *Q. virginiana* Mill (hojas) ( $4.708 \text{ kcal kg}^{-1}$ ); lignina ( $6.100 \text{ kcal kg}^{-1}$  a  $6.558 \text{ kcal kg}^{-1}$ ); Celulosa ( $3.700 \text{ kcal kg}^{-1}$  a  $4.185 \text{ kcal kg}^{-1}$ ).

Del análisis de varianza se obtuvo una alta correlación de las especies con la época del año, con un efecto no significativo con respecto a las zonas. El resultado es de cuatro especies, pero fue necesario comprobarlo con un total de 20 especies, lo que confirmó que existen altas diferencias significativas entre las especies estudiadas, así como una alta correlación con la época del año. Los máximos valores de poder calorífico se presentan en invierno y verano, estando los mismos ligados al periodo de cese de la actividad vegetativa y máxima lignificación. Los valores en primavera y en otoño son más bajos en debido a que estas épocas se produce la formación y el crecimiento de los tejidos.

En el mismo documento reporta además una tabla de equivalencias energéticas y abreviaturas más frecuentes en la que compara diferentes expresiones como por ejemplo que  $1 \text{ kcal kg}^{-1} = 1 \text{ cal g}^{-1} = 1,8 \text{ BTU lb}^{-1}$ . En este trabajo concluye que mediante este procedimiento es posible deducir el balance energético de un incendio forestal y a la vez clasificar las especies forestales según su carácter energético, estableciendo la diferencia entre especies y estaciones del año que puede ser aplicado tanto a la prevención de incendios forestales como al aprovechamiento energético de residuos forestales. Concluye el trabajo afirmando que un poder calorífico superior se presenta en aquellas especies que presentan mayor lignificación, que son más densas y que tienen mayor contenido de resinas, terpenos y aceites esenciales. A medida que se lignifican los tejidos su poder es más alto ( $6.100 \text{ kcal kg}^{-1}$ ), pero no coincide a lo largo con las concentraciones de sustancias de impregnación por la variación en el año, presentando una curva muy especial. Comparando especies septentrionales y europeas indica que las primeras presentan frecuentemente más resinas, esencias y crecimiento lentos.

La variación del PCS se debe a que las especies en forma individual presentan diferencias en la finalización de su actividad vegetativa, aparición de volátiles y evolución según la estación (fenología). Para la zona de estudio el periodo invernal es extremadamente frío y se prolonga a los últimos días de Mayo (entre Febrero y Mayo decrecen los PCS) pero si en Mayo son abundantes las lluvias, se retrasa y se reduce la virulencia en la fase de verano.

La humedad de la planta juega un papel importante en el calor desprendido en la combustión a presión constante, pero las especies secas en la estufa es la única base de partida para medir el flujo de energía.

Núñez *et al.*, (1999) diseñaron mapas de índice de riesgo como herramienta para la prevención de incendios forestales en la costa de Galicia. Lo hicieron mediante la determinación de parámetros termoquímicos como son los valores calorimétricos, inflamabilidad, composición química elemental y contenido de metales pesados durante las cuatro estaciones del año de las diferentes especies forestales. Para la colecta se consideró una hectárea de bosque de cada una de las áreas estudiadas, las parcelas fueron divididas en sitios de  $1 \text{ m}^2$ , de los cuales aleatoriamente se seleccionaron 5. De cada uno de ellos se consideró el volumen de corteza, ramas no mayores a 8 cm, conos de árboles, frutos, hojas y en general todas las partes vivas del árbol. Esta muestra de volumen fue reducida al procedimiento de cono o cuarto que es una muestra representativa de 1 kg. Parte de la muestra fue empleada para inflamabilidad siguiendo la norma UNE -23-721 usando un radiador estándar de 500 W de acuerdo a las tablas propuestas por Valette (Valette *et al.*, 1988; Hernando *et al.*, 1989).

La muestra restante fue pesada en una balanza de alta precisión y se dejó durante 12 horas en una estufa de secado para determinar su humedad mediante el procedimiento de pérdida de peso. Posteriormente la muestra fue molida con dos molinos diferentes, se homogenizó y se prepararon pastillas de 1 g para los experimentos de calorimetría. Dichos ensayos se llevaron a cabo en una bomba calorimétrica estática a una atmósfera de oxígeno de  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ , siguiendo el método propuesto por Hubbard *et al.*, (1956) (Hernando *et al.*, 1989). La muestra molida se dividió en dos fracciones. Una se usó para el análisis de humedad, densidad y composición promedio de cada especie estudiada. La otra se sometió a análisis espectrofotómetro de absorción atómica mediante la que se calculó el contenido en Cu, Cd, Zn; Pb, Mn y también se determinó la composición elemental (C, H, O, N, S y Cl) con un equipo de análisis elemental.

En todos los experimentos, el calorímetro fue llenado con una masa de agua de 4.631 g; la bomba se llenó con oxígeno C-45, al 99,99 % de pureza, de la compañía Carburos Metálicos. La bomba está conectada a una computadora y se emplea un controlador de temperatura con una precisión de  $0,003 \text{ }^\circ\text{C}$  por semana. La energía equivalente fue determinada realizando 5 experimentos de calibración, teniendo en cuenta la desviación estándar de los promedios. De los resultados destaca que *Pinus sylvestris* L. presentó un índice de riesgo alto, presentando 4 en verano y 3 en el resto del año. El alto riesgo de todas las coníferas es debido a la presencia de resinas y compuestos con altos valores calorimétricos (alrededor de  $40.000 \text{ kJ kg}^{-1}$ ). El *Eucalyptus globulus* Labill presenta alto riesgo en periodos de verano (índice de riesgo 4), cuando todos los parámetros tales como poder calorífico, inflamabilidad, vientos secos, baja humedad y crecimiento de lluvias favorecen los incendios forestales. Los robles y mezclas de especies presentan un bajo índice de riesgo en todo el año. En otoño tiene lugar la caída de hojas y en esta época algunos árboles presentan su periodo de máxima actividad con un índice de riesgo de 2. Árboles de 30 años presentan una alta cantidad de lignina que posee una PCS es de  $25.900 \text{ kJ kg}^{-1}$ , mientras que el PCS de celulosa es de  $18.200 \text{ kJ kg}^{-1}$ . Esto significa que el índice de riesgo aumenta con la edad. Los arbustos presentan un alto índice de riesgo con valores máximos en verano y otoño de 3. Estas especies son peligrosas por su facilidad para la ignición y propagación de incendios. Los residuos forestales (hojas, pequeñas ramas y frutos) presentan un PCI alrededor de  $6.200 \text{ kJ kg}^{-1}$  y pueden ser empleados como fuente alternativa de energía. La biomasa muerta de robles y coníferas con un bajo contenido de humedad (menor 35 %) presenta un alto poder calorífico de  $19.200 \text{ kJ kg}^{-1}$  y una alta inflamabilidad de 4 y 5, respectivamente. Estos resultados dependen de las condiciones climáticas, que son las principales responsables de los incendios forestales. Para el caso de *Quercus robur* L., en primavera el valor del PCS corresponde a la clase 2 y a una inflamabilidad de clase 5.

En otro trabajo, para realizar el muestreo se eligió una hectárea de cada zona forestal y se dividió en 5 parcelas de 1m<sup>2</sup> que se escogieron al azar. Se recogieron cortezas, ramas con diámetros menores a 8 cm, conos de árboles, frutos, hojas y en general todas las partes vivas del árbol. Aplicando la misma metodología de Núñez et al. (1999) se determinaron la inflamabilidad, composición elemental, metales pesados y poder calorífico. En los resultados se refleja la evolución de los parámetros físicos y químicos a lo largo del año en función de la variable climática y el estado de las diferentes especies.

Con los datos climáticos se construyeron diagramas bioclimáticos de zona de alta montaña continental. Los promedios de los valores calorimétricos de las especies representativas fueron ordenados en cinco clases energéticas (Núñez et al., 1999) tal y como se refleja en la Tabla 2.

Clases	Rangos en kJ kg <sup>-1</sup>
Clase 1	<16.747 kJ kg <sup>-1</sup>
Clase 2	16.747-18.841 kJ kg <sup>-1</sup>
Clase 3	18.841-20.934 kJ kg <sup>-1</sup>
Clase 4	20.934-23.027 kJ kg <sup>-1</sup>
Clase 5	>23.027 kJ kg <sup>-1</sup>

Tabla 2. Clasificación del poder calorífico por Núñez et al., 1999.

Las especies estudiadas fueron *A. pseudoplatanus* L; *C. sativa* Miller; *Q. Robur* L; *S. aucuparia* L; *T. Baccata* L; *Q. Pyrenaica* Willd; *P. radiata* D; *P. sylvestris* L; *S. Scoparius* (L) Link y brezales.

El mapa de índices de riesgo de incendios forestales se realizó con la tabla de inflamabilidad de las especies forestales para las cuatro épocas estacionales del año, la tabla de los promedios altos y bajos de los valores caloríficos a lo largo del año, el diagrama bioclimático y la tabla que relaciona los promedios caloríficos altos y valores de inflamabilidad e índice riesgo de *P. radiata* y brezales.

Las especies de la zona fueron clasificadas mediante rangos de valores caloríficos, inflamabilidad e índice de riesgo. Esta tabla proporciona información acerca del comportamiento de las diferentes especies en el caso de incendios forestales, y que puede ser empleada para prevenir y/o combatir incendios forestales. El caso de *S. Scoparius* Link puede ser un ejemplo de un mecanismo de una autodefensa natural al combate de incendios forestales, debido a que su inflamabilidad es muy similar durante todo el año. Otras especies tal como *P. radiata*, *P. sylvestris*, L. y *C. Sativa* Miller muestran un alto poder calorífico y una inflamabilidad baja, lo que implica una gran resistencia a la ignición y un riesgo de incendio forestal mínimo.

Una excepción a esta regla es *P. pinaster* Aiton, el cual presenta un alto poder calorífico y también alta inflamabilidad durante todo el año, debido a su contenido en resinas, aceites esenciales y la buena disposición para iniciar y propagar incendios forestales en lugares donde existen grupos de estas especies de alto riesgo a incendio. La zona Devesa da Rogueira (Galicia) presenta un alto índice de riesgo por la facilidad de originarse los incendios forestales, debido a especies tales como arbustos y coníferas con una alta inflamabilidad durante todo el año, robles con altos valores calorimétricos e inflamabilidad. También facilita la propagación del fuego el *Quercus robur*, *C. sativa* y los residuos forestales de la zona pueden alcanzar un valor promedio superior a los 20.000 kJ kg<sup>-1</sup>, lo que favorece que este residuo se emplee como una fuente alternativa de energía (Núñez et al., 1999 (a)).

Se crearon herramientas para la prevención de incendios forestales mediante el diseño de mapas de índice de riesgo en las zonas de ladera de Galicia (Núñez et al., 2000 (b)). La colecta de muestras se realizó como lo menciona en sus procedimientos Núñez et al. (1999; 2002). Los resultados se completaron con diagramas bioclimáticos de la zona, presentando para invierno y primavera un índice de riesgo 3, que se incrementa en verano y otoño a 4. Esto se debe a una consecuencia de varios factores como condiciones climáticas favorables que incrementan la temperatura, desciende el contenido en humedad, lluvias, etc. Otro factor son condiciones biológicas extremas, lo que se refleja en un incremento de resinas y aceites esenciales generados principalmente por coníferas, que tienen un alto PCS e inflamabilidad.

Los residuos generados especialmente por robles y arbustos tienen un alto PCS, bajo contenido de humedad y alta inflamabilidad. Cuando la actividad vegetal se detiene en otoño e invierno, el riesgo a incendio forestal es alto si en estas estaciones hay sequías y fuertes vientos prevalecientes en la zona. El índice de riesgo en las laderas depende particularmente de las coníferas y arbustos, y de los brezales como *S. scoparius* Link. y *U. europaeus* L. que representan el 70 % de la zona forestal.

Las mezclas con especies de robles como *Quercus robur* L., *C. sativa* Miller, *A. pseudoplatanus* L., *F. sylvatica* L., coníferas y arbustos son la principal causa del descenso de índice de riesgo en primavera e invierno a un valor 3 o menor, dependiendo de las condiciones climáticas, fuertes lluvias y bajas temperaturas.

Las especies de encino actúan como corta fuegos naturales debido a su alto contenido en humedad, y a su bajo contenido de resinas y aceites esenciales durante el verano y otoño. Las especies forestales como los arbustos mantienen una alta inflamabilidad pero un bajo poder calorífico, que actúan como una autodefensa natural contra los incendios. Los mapas diseñados por la combinación de mapas energéticos e inflamabilidad teniendo en cuenta valores de todo tipo de parámetros, son efectivos para la prevención y combate de incendios. Los máximos valores del poder calorífico inferior (PCI o LHV) en *Pinus pinaster* Aiton, *P. sylvestris* L., *P. radiata* D. E. *europaeus* L., *S. scoparius* Link se presentan a finales de verano y principios de invierno. Las coníferas y robles presentan un índice de riesgo 4 y 5 en verano respectivamente, mientras que otras especies forestales y arbustos presentan un índice de riesgo 3 y 4 en otoño.

Núñez *et al.* (2000) crearon mapas de índices de riesgo de zona continental de alta montaña en la zona de Galicia, como herramienta para la prevención de incendios forestales mediante valores calorimétricos, inflamabilidad y composición química de especies forestales. En este estudio se combinaron mapas de energía con las características bioclimáticas de la zona y con las principales propiedades biológicas de las diferentes especies para determinar el índice de riesgo estacional. En el muestreo se utilizó la misma metodología, con mínimas modificaciones, que se había empleado en este grupo de investigación en trabajos anteriores (Núñez *et al.*, 1999; 1999 a). Para este caso se consideraron parcelas de 1 m<sup>2</sup>, ramas que fueran menores a 8 cm, y para el procedimiento de cono o cuadrado se recurrió a un volumen de 1 kg. La muestra restante fue dividida en dos fracciones, una para el análisis de determinación de humedad, densidad, composición promedio de cada una de las especies estudiadas, análisis de metales, composición química elemental y otra para determinar los valores calorimétricos. Con los resultados construyeron varias tablas en las que se recogieron valores calorimétricos, inflamabilidad, composición química, densidad, humedad y contenido de cenizas. Las coníferas presentan en verano un riesgo extremadamente alto debido a la acumulación de resinas y aceites esenciales producidos en esta estación. El índice riesgo en el año varía según la especie; *Pinus pinaster* Aiton y *P. sylvestris* L. presentan riesgo medio y alto 3 y 4, respectivamente. En bosque mixto de pino-encino puede incrementar el índice de riesgo en otoño debido a la acumulación de residuos forestales como son hojas y ramas secas. La especie *Taxus bacata* L. muestra en promedio un índice 3, que en verano aumenta a 4 por la producción de resinas y aceites esenciales. Los encinares presentan, en promedio, riesgo de incendio de 3 y la acumulación de los residuos puede ascender a 4 por su alto poder calorífico, inflamabilidad y bajo contenido de humedad. Los brezales y arbustos tienen un comportamiento similar a las especies mencionadas con índice riesgo 4 en verano y 2 en el resto del año. *S. scoparius* Link y brezales predominan en la zona y presentan un poder calorífico e inflamabilidad estable; sin embargo, en verano puede incrementar a 5 el índice de riesgo.

El diseño de mapas de índice de riesgo en la zona húmeda Atlántica de Galicia se recoge en el estudio de Núñez *et al.*, 2000 (a). Para el muestreo se seleccionó 1 hectárea de cada tipo de bosque del cual fueron escogidas cinco zonas de 1 m<sup>2</sup> establecidas al azar, siendo el muestreo similar al empleado en el trabajo Núñez *et al.*, 1999. Se consideraron ramas menores a 6 cm, hojas, frutos caídos, restos de podas y cosechas de las actividades forestales. Las partes vivas fueron usadas para análisis infrarrojo, se aplicó el procedimiento de cono o cuarto a volúmenes de 1 kg. Para calorimetría se emplearon pastillas de 1 g y para inflamabilidad un radiase usó un radiador de 500 W siguiendo la norma UNE-23-721. Se realizaron 75 experimentos para cada especie considerando 1 gramo de muestra como establece el procedimiento Valette. El resto de la muestra fue empleado para análisis fisicoquímico, metales pesados y química elemental. De los metales pesados se puede establecer que el Mn se presenta en altos contenidos en la época de floración, lo que es contrario al resto de los elementos estudiados, debido a que este ión es fundamental en el transporte electrónico desde el agua en el fotosistema II. Los *Pinus pinaster* Aiton, *P. radiata* D; *P. sylvestris* L. muestran un alto poder calorífico en las diferentes estaciones a lo largo del año; estas especies son peligrosas en primavera y verano por su alta inflamabilidad (4 y 5, respectivamente) y un alto poder calorífico debido a la presencia de resinas y aceites esenciales (40.000 kJ kg<sup>-1</sup>). Las especies de arbustos presentan un alto poder calorífico a lo largo de todo el año, lo que puede considerarse como un mecanismo de defensa natural. Los índices de riesgo fueron calculados para las diferentes especies de árboles y arbustos de acuerdo a su alto poder calorífico PCS e inflamabilidad siguiendo las tablas propuestas por Doat y Valette. La Tabla 3 muestra los poderes caloríficos superiores (PCS o HHV) de las distintas clases.

Clases	Rangos en kJ kg <sup>-1</sup>
Clase 1	<18.500 kJ kg <sup>-1</sup>
Clase 2	18.500-19.500 kJ kg <sup>-1</sup>
Clase 3	19.500-20.500 kJ kg <sup>-1</sup>
Clase 4	20.500-21.500 kJ kg <sup>-1</sup>
Clase 5	>21.500 kJ kg <sup>-1</sup>

Tabla 3. Clasificación del poder calorífico por Núñez *et al.*, 2000 (a).

Para la obtención de los resultados finales se modificaron las clases originales de acuerdo a las características de las diferentes especies forestales existentes en la zona. Todos los valores de poder calorífico se presentan en  $\text{kJ kg}^{-1}$ .

De forma general, se observó que los altos valores en los poderes caloríficos para *U. europaeus* L., *S. scoparius* Link y coníferas durante la Primavera, el verano y el Invierno, coincidían con mínimos valores de inflamabilidad debido a las abundantes lluvias, temperaturas medias y alto valor de humedad, reduciendo así el riesgo de incendio.

El estudio del *Eucalyptus globulus* Labill se realizó con árboles de 15 años de edad muestreados en verano e invierno. La información analizada, y que generó la obtención tanto de valores calculados y experimentales en el laboratorio, ayudó a establecer una información numérica relacionada con las diferentes propiedades fisicoquímicas. Para obtener el índice de riesgo se realizaron algunas relaciones con los diferentes parámetros obtenidos, además se emplearon promedios normalizados de algunos parámetros. Se obtuvieron valores con las mismas relaciones entre los parámetros y se obtuvo un índice de riesgo final. Cabe mencionar que algunos parámetros biológicos presentan una influencia fuerte sobre el índice de riesgo, por ejemplo en árboles maduros parte de la celulosa es sustituida por la lignina con un alto poder calorífico ( $26.000 \text{ kJ kg}^{-1}$ ) y se generan residuos forestales con un PCS alto ( $19.000 \text{ kJ kg}^{-1}$ ), alta inflamabilidad (4 y 5) y bajo contenido de humedad (menor 30 %). Todo ello facilita la ignición y propagación de fuego. La presencia de resinas y aceites esenciales con un alto PCS ( $40.000 \text{ kJ kg}^{-1}$ ) crean en verano una atmósfera altamente inflamable. El periodo de floración lleva asociado un alto contenido de humedad por las hojas jóvenes, flores y abundantes partes verdes lo que reduce el riesgo de incendio forestal. Mediante la combinación de los índices de riesgo obtenidos con los inventarios forestales se obtuvieron los mapas de índice de riesgo.

En el año 2001, Núñez *et al.*, realizaron cálculos de índice de biomasa forestal para emplearlos como una herramienta de combate contra incendios forestales, aplicando la misma metodología que en el año 1999. Se seleccionó un tipo de bosque de 1 hectárea, en la que se escogieron al azar 5 sitios de  $1 \text{ m}^2$ . Se realizaron ensayos de inflamabilidad con 75 muestras por especie, además de experimentos calorimétricos, composición química elemental y metales pesados. Las especies evaluadas fueron *Eucalyptus globulus* Labill y *Pinus pinaster* Aiton, que son árboles muy representativos de la zona. La colecta consistió en frutos, hojas, ramas diámetro igual mayor a 6 cm y otras ramas menores a 6 cm de diámetro, utilizando el mismo procedimiento del cono y cuarto obteniendo 1 kg de muestra. Las partes vivas fueron usadas para análisis infrarrojo mientras que los residuos se utilizaron para evaluación energética. De los resultados se estableció que el Mn presenta valores altos en época de floración. Se observaron relaciones entre PCI y el contenido de humedad; bajos contenidos de humedad y altos PCI se detectaron en otoño e invierno, mientras que los valores del PCS y del contenido de cenizas fueron bajos. Se concluyó que los residuos favorecen la ignición y la propagación de incendios forestales, pues presentan promedios de PCI de  $6.800 \text{ kJ kg}^{-1}$  y PCS  $19.759 \text{ kJ kg}^{-1}$  y valores de inflamabilidad de 5 y una baja humedad (30 %). Las coníferas contienen una alta acumulación de resinas principalmente en primavera y verano, lo que da lugar a un alto PCS ( $40.000 \text{ kJ kg}^{-1}$ ) y una alta inflamabilidad (5). Las especies fueron clasificadas de acuerdo a su PCS siguiendo las tablas propuestas por Valette, que fueron modificadas ya que se obtuvieron los valores reales de valores caloríficos e inflamabilidad de las especies forestales existentes en la zona de Galicia estudiada.

De forma general vemos como se repite de forma muy insistente que a elevados valores de índices de riesgo, éstos se corresponden a periodos con altas temperaturas y baja humedad ambiental, y esto suele coincidir con el verano. Además como norma general se puede observar como las coníferas son especies con alto índice de riesgo como consecuencia de la presencia de resinas.

Núñez *et al.*, 2002 (a) empleó la bomba calorimétrica para determinar el índice de riesgo de incendios forestales asociado a residuos de *Pinus*. Se obtuvieron variables sobre inflamabilidad, composición química de las especies y diagramas bioclimáticos. Para estos estudios se consideraron extensiones de muestreo de 1 ha en donde se distribuyen individuos de *Pinus pinaster* Aiton en superficie mínima de 10 ha. Además, se recogió información climática, humedad, clase de suelo, pendiente, tipo de aprovechamiento forestal, y promedios de altura de árboles. Se marcaron dos árboles que fueran representativos y posteriormente se recogieron muestras de los mismos. Los residuos recogidos fueron divididos en tres clases diferentes: hojas, ramas con diámetros menores a 3 cm, entre 3 cm y 6 cm además de otro tipo de residuos como corteza y ramas con diámetros entre 6 y 8 cm. Se mezclaron las muestras y las ramas fueron cortadas en pequeñas piezas, obteniendo un volumen mediante el procedimiento del cono o cuarto de 5 o 6 kg. Los residuos de la cosecha de Noviembre y aquellos abandonados en el suelo forestal se colectaron en Marzo y Agosto con el fin de estudiar los cambios de los valores caloríficos e inflamabilidad debidos a la degradación causada por la exposición al viento y al agua. Las muestras fueron guardadas en bolsas herméticas para evitar la pérdida de humedad y, en menos de 10 horas, se llevaron al laboratorio donde fueron pesadas y secadas en estufa a  $105^\circ\text{C}$  para, mediante el análisis de la pérdida de peso, calcular su contenido en humedad.

Parte de la muestra fue empleada para calcular inflamabilidad mediante un radiador estándar de 500 W. Los valores fueron obtenidos según las tablas propuestas por Valette. Determinada la humedad, la muestra fue molida con dos molinos diferentes, se homogenizó y se prepararon las pastillas para ser usadas en experimentos calorimétricos y determinar además el porcentaje de cenizas posterior a la combustión. Los ensayos calorimétricos fueron hechos con una bomba calorimétrica estática mediante el procedimiento de Hubbard. La bomba fue sumergida en 4.631 g de agua destilada, mediante un controlador de temperatura el agua se mantuvo circulando a una temperatura de 25 °C con una precisión de 0,003 °C por semana. Las correcciones de temperatura fueron realizadas a través de un programa de ordenador.

La otra parte de la muestra se dividió en dos fracciones, una fue empleada para la medición de la densidad y composición química elemental (C, H, N, O y S), y la otra se almacenó en condiciones adecuadas para realizar futuras comprobaciones. Se trabajó además con información de parámetros físicos y bioclimáticos de las dos zonas ya que estos tienen una importante influencia sobre la producción de biomasa. En las siete zonas estudiadas, los valores calorimétricos PCS presentaron diferencias menores al 6 % mientras que las de los PCI fueron del 18 %, debido al contenido de humedad. Los valores de PCS de las hojas son altos, lo que está asociado, en general, a la trementina de las acículas, y a la acumulación de aceites esenciales. Los valores de humedad, densidad y cenizas son también altos para las hojas. Como punto destacado, se puede observar que para el *Eucalyptus globulus* Labill en su composición elemental se observa que el nitrógeno incrementa en las muestras de materia muerta. Los residuos forestales antes y después de la cosecha presentan grandes diferencias debido a la humedad ambiental y a la lluvia. Para el caso de mes de Agosto presentaba un riesgo de inflamabilidad de 4. Debemos tener en cuenta que las condiciones climáticas no presentan una importante influencia sobre PCS debido a que su cálculo se hace sobre la base de humedad cero. La materia muerta presenta promedios de PCS y PCI que aumentan sustancialmente en Agosto y presentan un índice de riesgo de 5. Para la materia viva el mayor riesgo se presenta en Julio con 5 y en Noviembre de 3. En las muestras del volumen de las fracciones, PCS es prácticamente constante durante todo el año, mientras que el comportamiento de PCI no es regular porque depende del contenido de humedad de cada estación del año.

El *Eucalyptus globulus* Labill presenta alto valor de Noviembre a Enero debido a que baja su producción vegetativa y concluye que en los pinos, cuando se cosecha, deben removerse completamente los residuos generados.

Diferentes estudios realizados para *Eucalyptus* y encino recomiendan dejar en la zona de explotación forestal un 10 % de residuos que faciliten reponer los nutrientes en el suelo contenidos en los residuos.

Se han realizado estudios en Galicia de los valores calorimétricos en áreas de alrededor de 240.000 hectáreas de aprovechamientos forestales de *Eucalyptus* para la obtención de celulosa. Los residuos tienen enorme influencia en el origen y en la propagación del fuego; por tal razón determinó el índice de riesgo de los residuos forestales lo que implicó la determinación de valores calorimétricos, inflamabilidad, composición química elemental y parámetros ambientales. El estudio se realizó en tres áreas diferentes: Cedeira (A Coruña), As Pontes (A Coruña) y Ferreira (Lugo). El muestreo se relacionó con los programas de corta, fechas de recogida realizadas en Noviembre (otoño), Enero, Febrero (invierno), Mayo (primavera) y Julio, Agosto, Septiembre (verano), estos últimos debido a la fuerte influencia de cambios climáticos generados por las altas temperaturas y la reducción de lluvias. Las muestras fueron recogidas en áreas forestales cuya población principal es de eucalipto y se tomó información de datos climáticos, propiedades físicas como temperatura, humedad, tipo de suelo, pendiente y tipo de aprovechamiento forestal. La muestra fue elegida de acuerdo al promedio de los árboles y dos de los árboles, que deberían localizarse a la mitad de la zona de aprovechamiento, fueron marcados para el análisis, considerando hojas, ramas con diámetros menores de 3 cm, y ramas con diámetros de 3 a 6 cm. Otros residuos originados de actividades forestales, como corteza y ramas con un diámetros entre 6 y 8 cm también fueron considerados. Colectaron una cantidad de volumen de 5 a 6 kg y el resto fue abandonado para posteriores estudios de calorimetría e inflamabilidad de biomasa muerta y viva. Las muestras recogidas se guardaron en bolsas herméticas y llevadas en menos de 10 horas al laboratorio, fueron pesadas y se determinó la humedad mediante pérdida de peso; se evaluó la inflamabilidad con un radiador de 500 W. El material preparado para calorimetría (pastillas) y otra parte de la muestra fueron molidos para la medición de la densidad y determinar la composición química mediante un equipo de química elemental. El análisis calorimétrico se llevó a cabo con una bomba estática Parr 1108 siguiendo los procedimientos propuestos por Hubbard. Según los diagramas bioclimáticos de las estaciones climáticas de la zona, con información de más de 25 años sobre los valores calorimétricos, humedad, densidad y porcentaje de cenizas después de la combustión, los valores son muy similares en las tres estaciones forestales. Se concluyó que las hojas presentan un alto poder calorífico más alto que los dos tipos de ramas colectados. Esto podría ser debido a la concentración de aceites esenciales y otros tipos de compuestos volátiles (taninos).

De las ramas más delgadas se obtuvieron valores calorimétricos mayores que para las ramas gruesas, concluyendo, en todo caso, que el aprovechamiento energético de esta parte de los residuos no es significativo. El *Eucalyptus globulus* Labill. mostró valores muy bajos de inflamabilidad durante todo el año, debido a su alto contenido de humedad lo que establece que estos residuos son piroresistentes. Se concluye que el *Eucalyptus globulus* Labill puede ser considerado como un árbol de bajo riesgo con respecto a los incendios forestales, pero no así los residuos originados a partir de él, ya que éstos pueden ser determinantes en el origen de incendios forestales en estaciones con altas temperaturas y baja humedad ambiental. Estos residuos presentan un índice de riesgo 3 en Marzo, aconsejando por lo tanto realizar una limpieza racional del material como medida preventiva contra incendios forestales, a la vez que se debe ser cuidadosos para no provocar una infertilidad en el suelo (Núñez *et al.*, 2002).

### **2.3.8. Variables químicas de combustibles forestales (resinas, aceites, ceras y extractos)**

Como menciona Núñez *et al.*, 2002, las hojas presentan un valor calorimétrico más elevado que los tipos de ramas colectados. Esto podría deberse a la concentración de aceites esenciales y otros tipos de compuestos volátiles como taninos. Por la misma razón, las ramas más delgadas presentan mayores valores calorimétricos mayores que las ramas gruesas.

En México desde la década de los 70 se realizaron algunas determinaciones de los extraíbles en pinos, siendo muchas de estas sustancias extraíbles solubles en solventes orgánicos o en agua fría, motivo por el que se les ha dado esta denominación (Sandoval, 1979).

Las sustancias extraíbles de la madera pueden conocerse con otros nombres como extractos de la madera, componentes extraños de la madera, sustancias solubles de la madera, o sustancias incrustadas de la madera (Sandoval, 1979).

La mayoría de este tipo de compuestos es posible encontrarlos casi siempre en la madera en cantidades relativamente grandes. Por lo que los podemos clasificar de la siguiente manera (Sandoval, 1979):

1. Los componentes inorgánicos como los carbonatos y silicatos.
2. Terpenos y ácidos resínicos constituidos por las esterinas, alcoholes y ácidos grasos de alto peso molecular.
3. Monómeros y Oligómeros de carbohidratos, polialcoholes y ciclitoles.
4. Compuestos nitrogenados como son alcaloides y proteínas.
5. Compuestos aromáticos como las etilbenos, etilben fenoles y flavonoides.
6. Taninos, etc.

Este mismo autor menciona que el contenido de estos compuestos presentes en la madera, sobre una relación del 100 % con respecto de madera base seca, puede oscilar entre el 4 al 10 % aunque existen algunas especies que pueden presentar mayores contenidos. La relación de las sustancias extraíbles en madera presentan proporciones grandes entre un 10 al 20 % en algunas especies (Sandoval, 1979).

Por otro lado, y con una presencia muy inferior que los anteriores, la concentración de los componentes inorgánicos va del 0,2 al 0,9 % (como contenido de cenizas), pero para algunas maderas tropicales se encuentran hasta en un 5 %. Los terpenos y terpenoides se encuentran principalmente en madera de coníferas y presentan un proporción del 5 %. En la mayoría de las hojosas no se presentan este tipo de compuestos, pero es posible encontrarlas en algunas especies de latofoliadas en zonas tropicales. Los monómeros y oligómeros de carbohidratos se encuentran en pequeñas proporciones en la madera y principalmente en la savia. También es posible encontrar en pequeñas proporciones los compuestos nitrogenados como son proteínas y alcaloides. Las proteínas se pueden encontrar en todo tipo de plantas con una proporción menor al 1 % siendo la excepción la zona del cambium. Las sustancias fenólicas como son el etilben fenoles, colorantes y curtientes que constituyen los compuestos aromáticos la proporción es muy variada. Tal es el caso de especies Europeas como el castaño la proporción de material curtiente es insignificante en cambio en especies tropicales se presentan en proporciones por encima al 20 % (Sandoval, 1979).

Por la tanto, las sustancias extraíbles que se encuentra en la savia son principalmente monómeros de carbohidratos y proteínas. Los taninos se localizan en la sustancia celular así como también las sustancias inorgánicas. Las pectinas se encuentran junto con la lignina en la lamela media. Otras sustancias extraíbles como colorantes o etilben fenoles se localizan en la albura sobre tejido parenquimatoso, mientras que en las zonas de transición, duramen y espacios intracelulares la presencia de sustancias extraíbles aumenta (Sandoval, 1979).

Se realizó un estudio analítico de las sustancias extraíbles de cuatro especies del género *Quercus*: *Quercus resinosa*, *Q. laurina*, *Q. candicans* y *Q. obtusata*. Sin mencionar su localización y en el que utilizaron para su extracción alcohol-benceno, agua caliente, NaOH de diferentes partes del árbol como es de madera a la altura de pecho (dap), ramas, corteza y taninos en madera como en corteza. Los resultados que presentaron los extraíbles en madera son los siguientes: *Quercus resinosa* con alcohol-benceno a la altura de pecho presento un promedio de 4,57 % y en rama 4,15 %, en agua caliente para madera al (dap) 6,22 % y en rama 5,11 % en NaOH presento en madera al (dap) 20,89 % y en ramas 20,64 % (Sandoval, 1979).

Se realizaron igualmente ensayos sobre extracto de corteza para la especie de *Pinus oocarpa* (colectado en bosque de La Primavera) y *Pinus ponderosa* (colectado en el estado de Chihuahua). Estos estudios muestran que los taninos son el principio curtiente o agente contenido en las cortezas, maderas, frutos, hojas y raíces de gran número de plantas. Estos taninos son compuestos orgánicos complejos, solubles en agua. Se emplearon diferentes tamaños de partículas en el que se utilizo agua caliente y éter. Para el *Pinus oocarpa* de la Sierra de la Primavera presento un porcentaje promedio de extractos por medio de agua caliente con un tamaño de partícula 8 mm presento 3,94 % y con partícula 0,40 mm presentó 8,36 % de extracto. Con éter fue de 0,62 %. Para el caso de taninos con tamaño de partícula 8,0 mm presentó un promedio de taninos de 3,53 % y con partícula de 0,40 mm de 6,92 mm (Núñez, 1984).

Los extraíbles de compuestos de cuatro cortezas de coníferas que son *Pinus caribea*, *P. strobus*, *P. leiophylla*, *P. douglasiana* que fueron empleadas para la determinación de la actividad fungitóxica contra hongos xilófagos. El proceso de extracción empelado fue en matraz erlenmeyer con 10 horas de agitación continua con una temperatura de 19 °C y un hidromódulo de 1-8, por lo que las sustancias extraídas fueron recuperadas por evaporación a 50 °C en un rotavapor mediante la aplicación al vacío, para el secado de las soluciones fue al aire libre dentro de laboratorio en una periodo de dos semanas. Para los ensayos los extractos fueron preparados de 0,1, 0,5 y 1,0 g l<sup>-1</sup>. De las extracciones de corteza que se realizaron mediante acetona-hexano-agua (54:44:2 % v) se obtuvieron rendimientos del *Pinus strobus* de 12,34 %, *Pinus caribea* con el 8,92 %, *Pinus leiophylla* 10,78 % y 10,36 % para *Pinus douglasiana*. La coloración de los extractos fue determinante para cada especie de pino, tal fue para el *Pinus strobus* el extracto fue de color oscuro y presencia de ceras en mayor proporción que los otros extractos. El *Pinus caribea* presentó una tonalidad de color marrón con pequeñas proporción de ceras. En los extractos de *Pinus leiophylla* se observó una textura aceitosa, es decir que no se presenta con polvo a temperatura ambiente como sucede con las otras especies (García, 2000).

Al hacer referencia de la totalidad de extraíbles (resinas), compuestos fenólicos de la madera conocidos como o Pitch (Sandoval, 1979; Aguilar, 2004), se deben tener en cuenta además los compuestos extraños de la madera que pueden ser extraídos con agua o solventes orgánicos neutros o aún ser volatizados con vapor cerca de 3 % a 10 % de peso seco de madera. Las maderas de las gimnospermas contienen del 4 al 8 %, para las angiospermas se tiene entre 2 al 4 % (Browning, 1967).

Sobre la optimización de tamaño de partícula de corteza de *Pinus leiophylla* de la zona de Tapalpa, Jalisco, se determinó que para la obtención de extracto acuoso (taninos) se emplearon 100 g de corteza base seca/litro de agua a una temperatura de 80 °C durante 3 horas. En esta investigación se utilizaron diferentes tamaños de malla 3 con promedio de extracto total de corteza de 5,30 % y 3,65 % de taninos. Para la malla 10 se obtuvo 6,24 % de extracto total de corteza con el 4,52 % de taninos. La malla 20 presento 6,89 % de extracto total de corteza y 4,55 % de taninos. Con la malla 40 se tuvo un extracto total de corteza de 6,10 % con 4,33 % de taninos. En la mezcla de mallas 3, 10, 40 se presento un 6,70 % de extracto total de corteza y 4,28 % de taninos (Santos, 1986).

### **2.3.9. Localización de compuestos químicos en la planta**

Entre las especies maderables con mayor proporción de extraíbles se encuentran el *Alerce*, *Castaño*, *Abeto*, *Pinus*, *Abedul* y *Eucalyptus* (Aguilar, 2004).

El estudio de los componentes extraíbles de la madera es interesante cuando se emplea la madera de latifoliadas tropicales, pero los extractos de las angiospermas de clima templado y ciertas coníferas según Wallis (1999) merecen estudios más profundos (Aguilar, 2004).

En las latifoliadas se pueden encontrar cantidades considerables de resinas, ácidos grasos y material insaponificable en los vasos del duramen y en las células del parénquima.

Por lo tanto, la composición y concentración de extractos en la madera varían de acuerdo con la especie, la localización geográfica, la estación del año y aún dentro del mismo árbol (Sjöstrom, 1993; Tomado de Aguilar, 2004).

Entre las células de la lamela media se encuentran los extraíbles en pequeñas cantidades, pero en mayor proporción en los radios medulares y en las cavidades celulares. Dentro de los canales resiníferos podemos encontrar terpenos, ácidos resínicos y esterres, donde se generan cuando la madera envejece, por lo que los ácidos resínicos asumen una función de preservación.

Los extraíbles que se obtienen de los canales de resina de las coníferas son ricos en terpenoides. Los extraíbles del parénquima radial y axial están compuestos por grasas, ceras y esteroides (Islas, 1992).

En las células de las plantas se encuentran metabolitos secundarios, los cuáles son compuestos de bajo peso molecular y no están involucrados en la actividad del metabolismo principal, incluidos monoterpenos  $C_{10}$ , sesquiterpenos  $C_{15}$  y diterpenos  $C_{20}$  (Croteau y Johnson, 1985). En los canales resiníferos se produce la oleoresina que es una mezcla de compuestos terpenoides, flavonoides y de ácidos grasos, éstos juegan un papel importante en la resistencia a enfermedades y en la defensa contra el ataque de insectos fitófagos y hongos (Phillips *et al.*, 1999).

La resina se sintetiza en los ductos resiníferos de cada tejido específico, por lo que la composición obtenida de las diferentes partes del mismo árbol no es la misma. Por lo que las concentraciones de monoterpenoides pueden variar entre los diferentes, desde los tejidos de un mismo árbol, entre los mismos tejidos del mismo árbol o localizaciones geográficas (Mannien *et al.*, 1998).

#### 2.3.9.1. Clasificación fisiológica de los compuestos químicos

De acuerdo a su clasificación se puede dividir en tres categorías fisiológicas:

1. Resinas defensivas, se encuentran conformadas por terpenos, ácidos resinosos y compuestos fenólicos que protegen al árbol contra daño biológico.
2. Resinas de almacenaje tales como grasas, ácidos grasos y ceras son reservas de alimento que es suministrado por el mismo árbol.
3. Hormonas vegetales.
4. Los extractivos o extractos se encuentran presentes en hojas, acículas, corteza, ramas, flores, frutos, semillas y exudados del árbol. Pero los extractos de mayor importancia se encuentran en la madera, ya que la presencia o ausencia de estos compuestos pueden ser determinantes para la identificación de algunas maderas (Sjöström, 1993; Aguilar, 2004).

#### 2.3.9.2. Técnicas de extracción de compuestos químicos

La diversidad de extraíbles ha desarrollado una gran gama de técnicas y métodos de aislamiento y caracterización de componentes individuales. El aislamiento de los componentes extraíbles de la madera se lleva mediante una extracción con mezclas de solventes neutros y/o solventes individuales en sucesión (Fengel *et al.*, 1989; Aguilar, 2004), y así por ejemplo Steller (1984) menciona que para la extracción de aceites esenciales, resinas, taninos, flavonoides se utiliza una mezcla de acetona-hexano-agua (García, 2000).

Entre algunos trabajos de Sandoval (1979) se menciona sin especificar zona de muestreo ni solventes utilizados para la extracción de compuestos químicos en *Quercus velutina*, *Q. robur*, *Q. cerris*, *Q. suber*, *Q. petraea*, etc, especies que se encuentran presentes en Estados Unidos de América y Europa, se determinaron compuestos fenólicos, ácidos grasos y resínicos, insaponificables, taninos, colorantes, gomas, adhesivos, azúcares, ácido elálgico, clorogénico, abiótico, metil eter, leuco antocianinos, quercitrina, etc.

Islas en 1992 realizó una investigación con *Pinus patula*, *P. longepedunculata*, *P. strobus chiapensis*, *P. ayacahuite*, *P. rudis*, *P. caribea*, a las cuales se les determinó la composición química mediante extracciones realizadas de acuerdo a las normas TAPPI 257 cm 85 y TAPPI om 88 del que se tuvo que usar un molino Retsh GmbH. Para realizar la separación de extraíbles de la madera se llevó a cabo mediante extracción con mezclas de solventes neutros y/o solventes individuales en sucesión. La naturaleza de los extraíbles no cambia apreciablemente con el tiempo o los solventes empleados (Aguilar, 2004). Además Caperos y Romero en 1991 mencionan que al moler la madera el rendimiento en la extracción se incrementa (TAPPI, 2000; Aguilar, 2004).

La separación de las sustancias extraíbles de la madera se pueden realizar para varios propósitos, entre ellos el determinar la concentración con que se encuentran, el estudio cuantitativo y cualitativo, y algunos estudios especiales sobre celulosa, hemicelulosa o lignina (Sandoval, 1979).

La investigación sobre las sustancias extraíbles puede ser motivada por diversos factores tales como descubrir y caracterizar nuevos compuestos orgánicos, clasificación taxonómica de especies, procesos de crecimiento del arbolado, obtención de nuevos productos y subproductos comerciales, estudios sobre la problemática en el aprovechamiento de la madera, control y producción de especies con características muy especiales (Sandoval, 1979).

Estudios relacionados con la composición química de la trementina tanto en acículas como madera son muy escasos (Sjödin *et al.*, 1996; 2000; Kleinhentz *et al.*, 1999; Latta *et al.*, 2000). Mannien en 2002 reportó para *Pinus sylvestris* L. que la concentración de monoterpenos es más grande en acículas con respecto a la madera, pero ésta última presenta más ácidos resínicos tricíclicos que en las acículas. Señalando además que la composición varía en el mismo árbol de acuerdo a sus diferentes exposiciones cardinales del mismo árbol (Rockwood, 1973; Roberts, 1970). Además la variación influye por el estado de desarrollo del árbol y estación del año (Rudloff, 1975). Actualmente se ha determinado que la emisión de monoterpenos son mayores en plantas jóvenes y que la cantidad es diferente en acículas primarias que en las secundarias (Loreto *et al.*, 2000). Además se ha encontrado que el estrés en *Pinus sylvestris* generado por la sequía incrementa sus concentraciones de varios monoterpenos y ácidos resínicos (Turtola *et al.*, 2003; Langenheim *et al.*, 1979).

Otra característica importante de la producción de monoterpenos y diterpenos, es que se encuentran relacionadas a las infestaciones por insectos y que puede incrementar su daño (Rafa *et al.*, 1983). Los monoterpenos constituyen parte de los volátiles de las coníferas y muchos de ellos presentan interacción insecto-conífera. Existe variación intraespecífica en la cantidad relativa de monoterpenos, así como en su composición en Latinoamérica, como las grandes diferencias entre los contenidos de los tejidos del mismo árbol. Esta variación en la composición de monoterpenos puede afectar la preferencia de los insectos por un tejido específico o por un árbol en particular (Sjödin *et al.*, 1996; Loreto *et al.*, 2000).

Mientras que las herramientas que se han utilizado para establecer la similitud de los grupos sanguíneos y determinar así el origen y migración de los diferentes grupos ó razas humanas, para las especies vegetales se ha establecido otras de acuerdo a su distribución geográfica por medio de sus constituyentes químicos como para el género *Pinus* (Mirov, 1961; 1967). Siendo la de mayor prioridad los compuestos volátiles de las oleoresinas, Mirov en la década de los 60 hace una contribución valiosa a este respecto, en el que reporta que el  $\alpha$ -pineno se ha encontrado en toda el área donde está distribuido el género *Pinus*, presentando algunas variaciones con respecto a su proporción. Otro compuesto que se ha encontrado en mayor proporción es  $\beta$ -pineno en especies que se localizan en el este de Norte América y Euroasia que las que se distribuyen en el Oeste de América y México. El  $\Delta$ -careno se ha reportado en el este asiático y oeste americano. Metil chavicol se encuentra solamente en pinos del Nuevo Mundo. Al Sur de la distribución general del género *Pinus*, el longifoleno ha sido reportado en más especies de pinos del oeste de Estados Unidos, aún no hay reportes para especies en la parte este, para algunas especies de México y en unas pocas en Asia. Un alcano que es el n-heptano su distribución se encuentra restringida al oeste de Estados Unidos y en algunas especies a lo largo de México (Mirov, 1961; 1967).

Por lo que los criterios alternativos con los morfológicos son útiles para la clasificación y la identificación de taxa en grupos de plantas en donde la falta de consenso, ubicación y delimitación de los diferentes elementos es una constante, como es el caso del género *Pinus*, pueden ser de mucha utilidad. Para que los componentes químicos de las plantas tengan importancia taxonómica, deben tener ciertas características, con patrones o perfiles tendientes a ser especie-específicos; es decir, una variación correlacionada y coherente entre taxa (Almaraz, 2000).

La composición de monoterpenos de las oleoresinas de los pinos ha sido ampliamente usada para apoyar en el estudio de la variabilidad genética y filiación taxonómica de ellos (Mirov, 1967; Perry, 1991; Farjon, 1997; Donahue, 1995). Se piensa convencionalmente que los monoterpenos están bajo control genético, y que los niveles totales de éstos varían con respecto a la estación y fenología (Langenheim, 1994). Los datos de monoterpenos tienen un papel importante en la delimitación de especies, como complemento a caracteres taxonómicos. Los ácidos resínicos de coníferas son empleados también como biomarcadores (Simoneit, 2005).

Las oleoresinas que se encuentran en especies de pinos mexicanos y mesoamericanos se diferencian claramente de otros pinos, los compuestos comúnmente reportados son principalmente  $\alpha$ -pineno y  $\beta$ -felandreno,  $\beta$ -felandreno, siendo estos compuestos para especies mexicanas y de mesoamérica casi únicos (Mirov, 1967). Los constituyentes más comunes de las oleoresinas son el  $\Delta$ -3-careno y el longifoleno, éstas raramente encontrados en pinos de otras regiones a excepción de especies del oeste de Norteamérica con la cuales hay relación estrecha. La oleoresina de *Pinus jeffreyi* localizados al norte de México presentan mayor proporción de n-heptano y mínima proporción de  $\alpha$ -pineno. *P. culteri*, al norte de México posee una resina en el cual sus componentes químicos domina  $\alpha$ -pineno más  $\beta$ -felandreno (Birks *et al.*, 1988).

De un único trabajo del que se tiene referencia sobre aceites esenciales para la Sierra de la Primavera y que se realizó en el campo experimental Bosque Escuela es el de Díaz, quién en 2008 estudió los aceites esenciales de follaje en *Pinus oocarpa* y *P. douglasiana* para las estaciones de verano, otoño, invierno (2005) y primavera (2006). Estas mismas especies fueron las muestras de las que se trabajó para el riesgo de incendio en esta investigación (M4 y M5), las especies fueron analizadas en cromatografía de gases acoplado a un detector de masas. Como resultado estableció que para *P. douglasiana* presenta mayor concentración de  $\alpha$ -pineno en las estaciones verano ( $342,29 \text{ mg l}^{-1}$ ) y otoño ( $602,56 \text{ mg l}^{-1}$ ). En cambio en invierno presentó mayor concentración en *Pinus oocarpa* ( $510,80 \text{ mg l}^{-1}$ ) y primavera ( $493,84 \text{ mg l}^{-1}$ ), como se muestra en la Tabla 4.

$\alpha$ -pineno		
Estación	<i>Pinus oocarpa</i> ( $\text{mg l}^{-1}$ )	<i>Pinus douglasiana</i> ( $\text{mg l}^{-1}$ )
VERANO	109,92	342,29
OTOÑO	52,14	602,56
INVIERNO	510,80	3,75
PRIMAVERA	493,84	152,17

Tabla 4. Cantidades de  $\alpha$ -pineno en *Pinus oocarpa* y *P. douglasiana* (Díaz, 2008).

Para el caso de la determinación de la concentración de  $\beta$ -pineno se presentan diferencias para *P. oocarpa* presentando mayores concentraciones en verano ( $589,12 \text{ mg l}^{-1}$ ), invierno ( $681,44 \text{ mg l}^{-1}$ ) y primavera ( $91,08 \text{ mg l}^{-1}$ ). En cambio en la estación de otoño el *P. douglasiana* presenta  $1683,80 \text{ mg l}^{-1}$ , como lo podemos observar en la Tabla 5.

$\beta$ -pineno		
Estación	<i>Pinus oocarpa</i> ( $\text{mg l}^{-1}$ )	<i>Pinus douglasiana</i> ( $\text{mg l}^{-1}$ )
VERANO	589,12	24,36
OTOÑO	13,54	1683,80
INVIERNO	681,44	4,01
PRIMAVERA	91,08	34,77

Tabla 5. Cantidades de  $\beta$ -pineno en *Pinus oocarpa* y *P. douglasiana* (Díaz, 2008).

Con lo que respecta al aceite limoneno presentó mayor concentración para *Pinus oocarpa* en la estación de verano ( $14,95 \text{ mg l}^{-1}$ ), invierno ( $1,05 \text{ mg l}^{-1}$ ) y primavera ( $98,72 \text{ mg l}^{-1}$ ). Para *Pinus douglasiana* solamente la mayor concentración se presentó en la estación de otoño ( $1798,90 \text{ mg l}^{-1}$ ) y en la estación de invierno no se detectó (NP) tal como se aprecia en la Tabla 6.

limoneno		
Estación	<i>Pinus oocarpa</i> ( $\text{mg l}^{-1}$ )	<i>Pinus douglasiana</i> ( $\text{mg l}^{-1}$ )
VERANO	14,95	5,40
OTOÑO	11,06	1798,90
INVIERNO	1,05	NP
PRIMAVERA	98,72	7,75

Tabla 6. Cantidades de limoneno en *Pinus oocarpa* y *P. douglasiana* (Díaz, 2008).

En lo que se refiere al aceite 1,8-Cineol para *P. oocarpa* se presentaron mayores concentraciones en verano ( $25,14 \text{ mg l}^{-1}$ ), invierno ( $36,25 \text{ mg l}^{-1}$ ) y primavera ( $22,59 \text{ mg l}^{-1}$ ) en *P. douglasiana* obtuvo sus mayores concentraciones en la estación de otoño, tal y como se presenta en la Tabla 7.

1,8-cineol		
Estación	<i>Pinus oocarpa</i> (mg l <sup>-1</sup> )	<i>Pinus douglasiana</i> (mg l <sup>-1</sup> )
VERANO	25,14	21,15
OTOÑO	6,14	22,00
INVIERNO	36,25	4,04
PRIMAVERA	22,59	16,77

Tabla 7. Cantidades de 1,8-cineol en *Pinus oocarpa* y *P. douglasiana* (Díaz, 2008).

Como se aprecia en la Figura 2, la especie de *P. douglasiana* presenta en la estación de otoño mayor concentración de  $\alpha$ -pineno y  $\beta$ -pineno, donde se han presentado plagas por descortezador en plantaciones forestales. Como se puede observar en la Figura 3, para *P. oocarpa* las mayores concentraciones de aceites ( $\alpha$ -pineno y  $\beta$ -pineno) se han presentado en invierno y primavera, las cuáles se encuentran estrechamente relacionada con el inicio de incendios, por lo que el periodo de incendios puede presentarse al comienzo de la estación (21 de Diciembre) o al inicio del año.

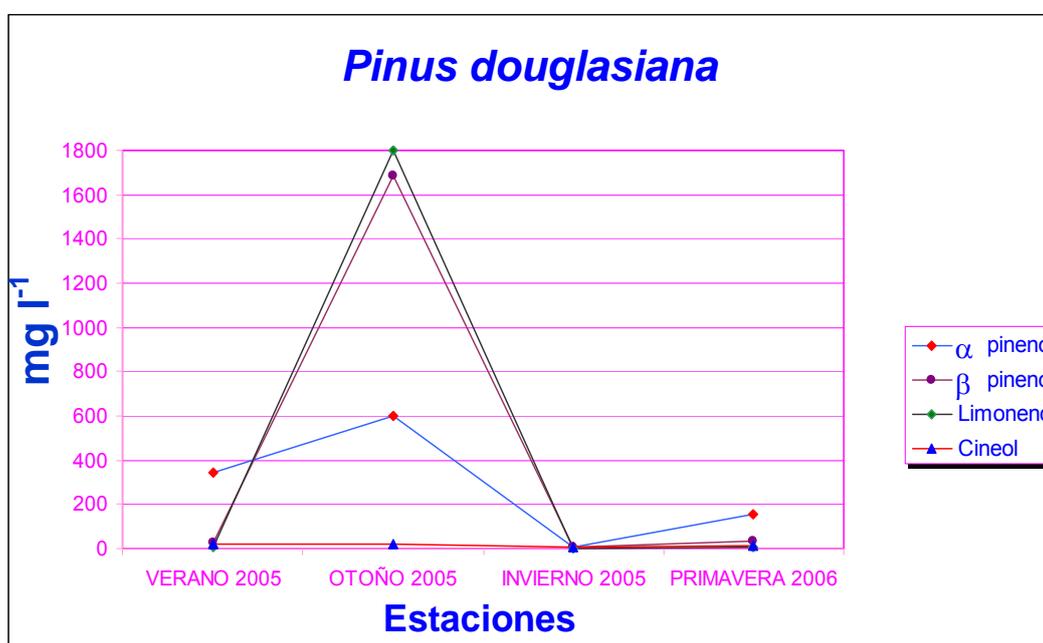


Figura 2. Distribución de componentes de *P. douglasiana* (Díaz, 2008).

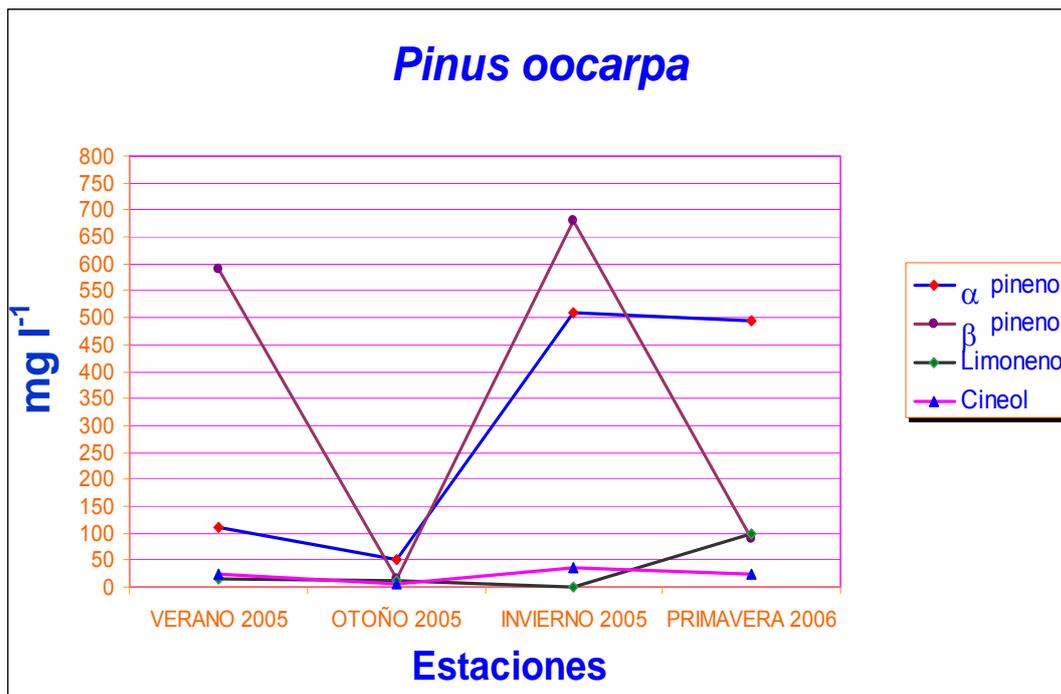


Figura 3. Distribución de componentes de *P. oocarpa* (Díaz, 2008).

De este trabajo de Díaz (2008) concluye que mediante los resultados del análisis por cromatografía de gases encontró variaciones de aceites con respecto a la especie y estación del año, tal el caso para *P. douglasiana* se determinaron altas cantidades para el  $\alpha$ -pineno, para el  $\beta$ -pineno y para limoneno se presenta en otoño, mientras que en *P. oocarpa* durante la misma estación  $\alpha$ -pineno,  $\beta$ -pineno resultaron ser los compuestos de mayor importancia. El compuesto en *P. oocarpa* que presentó menor concentración de aceite fue limoneno y se vio reflejado para todas las estaciones, mientras que en *P. douglasiana*, 1,18-cineol fue el que mostró menor concentración.

Algunas investigaciones han demostrado que la variación estacional de algunos componentes en diferentes especies vegetales está relacionado con las etapas de desarrollo (fenología), tal y como lo menciona Salido *et al.*, (2004), quienes reportan incrementos de mono y sesquiterpenos durante la floración y fructificación en lavanda. Algunas observaciones en campo en la estación de verano se observó una tendencia a incrementarse el  $\alpha$ -pineno en *Pinus douglasiana*, el cual está relacionado con la presencia de estróbilos masculinos maduros. La mayor abundancia de limoneno,  $\alpha$  y  $\beta$ -pineno coincidió con la etapa del desarrollo de hojas. Cuando ocurrió la abscisión de las hojas más viejas y comenzó el desarrollo de los estróbilos masculinos se observó una reducción de estos compuestos. En primavera, cuando los estróbilos masculinos alcanzaron la madurez y se observó la presencia de conillos del segundo año se incremento el contenido de  $\alpha$ -pineno.

#### **2.4. Descripción de las principales especies vegetales de México**

##### ***Pinus oocarpa* Schiede ex Schltdl.**

FAMILIA: PINACEAE

Subfamilia: Abietíneas

Género: *Pinus*

Especie: *oocarpa* Schiede ex Schltdl

NOMBRE COMÚN: Ocote chino, Pino chino, Pino colorado, Pino prieto, Pino tepo. Farjon *et al.*, 1997.

DESCRIPCIÓN:

Su fuste es recto o tortuoso con alturas de 30 a 35 metros y con (dap) de 100 a 125 centímetros (Farjon *et al.*, 1997). En cambio Martínez (1992) menciona que este árbol (Figura 4) presenta alturas entre los 12 a 18 metros y hasta los 25 metros con diámetros de los 40 a 75 centímetros. Sobre la altura de esta especie en la (SLP). Reyna (2004) menciona de 6 a 10 m. Sobre la productividad de esta especie determinada en el Bosque Escuela de la misma (SLP), la cuál es también conocida como calidad de sitio o de estación, con información obtenida del Inventario Forestal y mediante la aplicación de modelos matemáticos se determinaron 5 calidades de estación que van de los 9 a 17 m, así como su volumen maderable (Rodríguez, 1998). Su copa es por lo común es redondeada y frecuentemente compacta con ramas fuertes y extendidas.

Presenta una corteza gruesa en su tronco, escamosa, que se desprende en pequeñas o grandes placas longitudinales, con fisuras poco profundas de color café rojizo a gris café (Farjon *et al.*, 1997). Otra descripción al respecto es que presenta un aspecto agrietado de color oscuro a grisáceo con placas delgadas, largas y casi rectangulares de color amarillento interiormente. Las ramillas son morenas, ásperas al principio y posteriormente va tomando un aspecto escamoso y el aspecto áspero debido a la caducidad de la base de las brácteas va desapareciendo. De ejemplares del Estado de Zacatecas se muestra que dichas brácteas persisten por algún tiempo (Martínez, 1992).

Las acículas u hojas se presentan en fascículos de 5 (algunas veces de 3 o 4 árboles que tienen principalmente 5) de los 17 a los 30 cm de longitud y 0,8 a 1,4 milímetros de ancho, rectas, más frecuentemente rígidas (Farjon *et al.*, 1997). En cambio Martínez (1992) menciona como hojas que se presentan en grupos de 5 en algunas veces se pueden encontrar de 3 a 4 en algunos fascículos. Presentan una longitud de los 17 a los 30 centímetros, más comúnmente de 22 a 25, aglomeradas, anchamente triangulares de color verde claro, brillantes, tiesas y ásperas, rara vez suaves y flexibles (de ejemplares de Zacatecas y Sinaloa son más robustas que en regiones más al sur). Los tres bordes son finamente aserrados. Presentan dos haces vasculares contiguos o casi contiguos y los canales resiníferos son septales, es decir tocando al endodermo y al hipodermo, a veces con algunos internos o medios y con un número generalmente de 5 a 8. Las células de endodermo son grandes y a veces de sección casi circular y sus paredes son delgadas. El hipodermo es delgado, uniforme y sin entrantes en el clorénquima. En especímenes de Sultepec (México), se observaron algunos entrantes profundos. Sus vainas son persistentes de color oscuro de 20 a 30 milímetros y con escamas acuminadas, y yemas ovoides cónicas u oblongas de color castaño brillante.

Los conos se presentan de forma solitaria o en verticilos de 2-3 (-4), en pedúnculos fuertes y curvos, persistiendo por varios años, ampliamente ovoides a subglobosos cuando están cerrados, con la base aplanada y midiendo de 3 a 8 (-10) x 3 a 9 (-12) cm cuando están abiertos (Farjon *et al.*, 1997).

Otra descripción sobre los conos se menciona que son anchamente ovoides u ovoide cónico, cortamente atenuados a veces casi globulosos, fuertes, pesados algo reflejados y en ocasiones ligeramente oblicuos, colgantes de 5,5 a 8 cm de largo. El cono abierto puede presentar una longitud de 10 cm de diámetro. Sus conillos son subterminales, subglobulosos algo ensanchados en la parte media, sobre pedúnculos escamosos de unos 3 centímetros de largo, comúnmente solitarios, con escamas anchas casi triangulares con pequeñas puntas gruesas y casi romas (Martínez, 1992). Las semillas de 4 a 8 x 3 a 4,5 mm de color gris, frecuentemente con puntos negros, ala articulada de 8 a 18 x 4 a 8 mm de color café grisáceo (Farjon, *et al.*, 1997).

Se encuentra en gran variedad de tipos de bosque. En Mesoamérica el *P. oocarpa* es frecuentemente la única especie que se encuentra ampliamente distribuida en los bosques abiertos de pino, en México en áreas abiertas como son pinares, bosques mezclados con encino, en colinas bajas hasta las grandes cadenas montañosas. Los incendios son frecuentes en bosques donde predomina esta especie (Farjon, *et al.*, 1997).

En México se le encuentre al noreste de México (Sierra Madre Occidental) hasta Guatemala, Honduras, El Salvador y al noreste de Nicaragua. Se puede encontrar a una distribución altitudinal desde los 200 a 500 y de los 2.300 a 2.700 m de altitud (Farjon *et al.*, 1997). Usos de la madera que se emplea para leña o postes (Reyna, 2004).



Plantación establecida en 1985 (muestra 4).



Especie de Bosque Natural (muestra 1).



Conillo de primer año.

Conillo de segundo año.

Figura 4. Detalles de *Pinus oocarpa* Schiede ex Schltdl.

***Acacia pennatula* (Schtdl & Cham.) Benth**

FAMILIA: LEGUMINOSAE

Género: Acacia

Especie: *pennatula* (Schtdl & Cham.) Benth.

NOMBRE COMÚN: Tepame. Reyna, 2004.

DESCRIPCIÓN:

Son arbustos con alturas entre los 2 a 6 m (Figura 5) con una gran cantidad de ramas numerosas las que presentan espinas cónicas de 0,5 a 1,5 mm de largo. Su tallo o diámetro son cortos entre 5 a 25 cm. Su copa presenta una forma de parasol. Presenta hojas compuestas más largas que anchas de 10 a 20 cm de largo. Hojuelas entre 20 a 30 pares de 1 a 3 mm de longitud. Las flores presentan forma globosa y pueden presentarse solitarias o en grupos de 6 a 12 mm de diámetro de color amarillo claro. Su fruto es una vaina linear comprimida de 6 a 12 cm de largo, pubescente leñosa con la edad de color pardo, las semillas son de forma aplanada de 6 a 8 mm de longitud. Esta especie en la región florece en el mes de Abril a Marzo y fructifica de Julio a Agosto. Las vainas se utilizan para alimentar ganado (Reyna, 2004).



Área de vegetación secundaria.



Etapas de Fructificación.



Proceso de floración.

Figura 5. Detalles de *Acacia pennatula* (Schitdl & Cham).

***Quercus resinosa* Liebm.**

FAMILIA: FAGACEAE

Género: *Quercus*

Especie: *resinosa* Liebm.

NOMBRE COMÚN: Encino roble, roble, encino amarillo, roble blanco (González, 1986), Encino colorado, encino negro (Reyna, 2004).

DESCRIPCIÓN:

Árbol de 6 a 15 m (González, 1986) y de otros reportes para la (SLP) alturas de 5 a 16 m (Figura 6) (Reyna, 2004), con tronco corto y con diámetros de 30 a 70 (Farjon *et al.*, 1997), la corteza es café grisáceo a negra, con copa ancha y baja; sus ramillas por lo general cortas y gruesas de 4 a 10 mm de diámetro. Presenta una copa ancha y baja; sus ramillas por lo general son muy cortas y gruesas de 4 a 10 mm de diámetro, corteza café grisáceo a negra. Las hojas jóvenes son muy tomentosas en ambas superficies, el haz teñido de rojo debido a la cubierta de pelos glandulares vermiformes los cuales son más largos que los pelos estrellados; envés densamente pálido tomentoso, con abundantes pelos glandulares solamente sobre las nervaduras, las hojas maduras son decíduas, grandes y tiesas, pálido tomentosas de el envés, anchamente obovadas de 10 a 50 cm de largo y de 5 a 30 cm de ancho, de abruptamente angostas a ampliamente redondeadas o con menos frecuencia con el ápice obtuso u obtusamente acuminado, la base un tanto subcordada, con sus borde generalmente plegados, engrosados y revolutos, sinuados a ampliamente sinuado-dentados con 8 a 18 dientes de cada lado, por lo regular bajos, redondeados y asimétricos, los ápices son callosos pero con el mucrón generalmente doblado hacia adentro junto con el borde resolutivo, de 10 a 20 nervaduras de cada lado, ascendentes y pasan directamente hasta los dientes cuándo éstos están presentes, por lo general rectas y paralelas, no así las nervaduras intermedias; el haz es duro con apariencia lustrosa, rugulosa, con una fina y persistente pubescencia estrellada, sus nervaduras primarias son cortas y no bien impresas, las secundarias impresas y las pequeñas pálidas y convexas; envés densamente pálido tomentoso o con pelos suaves y delgados, los pelos son sésiles y sobrepuestos pero no ocultan la epidermis, que es papilosa y glandular pero no ampollada.

Tanto las nervaduras primarias como secundarias forman un elevado retículo, las nervaduras más pequeñas son discernibles, pecíolos de 5 a 15 mm de largo, tomentosos y con frecuencia envueltos entre lóbulos de la hoja, los amentos masculinos de 5 a 20 cm de largo, con raquis pilosos y glandular. Las flores femeninas de 1 a 10 agrupadas o dispersadas a lo largo de un pedúnculo, las anteras son pilosas de 1,5 a 2,0 mm de largo, con fruto anual solitarios o en grupos de 2 a 3 mm de largo; su bellota es ovoide de 15 a 35 mm de largo de paredes delgadas y apariencia arrugada cuando ya está seca, excepto cuando están completamente maduras, estas se encuentran cubiertas hasta una tercera parte de su largo por la cúpula. La especie florece de Marzo a Mayo y fructifica de Octubre a Noviembre (González, 1986).

En México es una especie endémica y se le puede localizar en Durango, al Sur de Zacatecas, Aguascalientes, Jalisco, Michoacán, Guanajuato, San Luis Potosí (González, 1986). Su distribución altitudinal va de los 1.300 a 2.300 m.

La madera de esta especie por su abundancia y distribución es aprovechada para leña, postería (Reyna, 2004), carbón, y horcones (González, 1986). Las hojas por su tamaño y dureza se utilizan en el campo para hornear pan y también para tejabanos de construcciones rurales (González, 1986).

Los encinares de *Quercus resinosa* son uno de los más característicos y extendidos en el estado de Jalisco y que pueden encontrarse a distribuciones altitudinales de los 1.300 a los 2.500 m en el N y NE de Jalisco.

Estos rodales pueden llegar a conformarse de masas puras, se asocian más frecuentemente con *Q. magnifolia* en donde existe una sospecha de una posible hibridación entre ambas. *Quercus resinosa* es propia de pino y encino a diferencia de *Q. magnifolia* que penetra en bosque mesófilo de montaña en donde alcanza grades tallas (González, 1986).



Bosque Natural.



Hojas.



Etapas de fructificación.

Figura 6. Detalles de *Quercus resinosa* Liebm.

### ***Pinus douglasiana* Martínez.**

FAMILIA: PINACEAE

Subfamilia: Abietíneas

Género: *Pinus*

Especie: *douglasiana* Martínez

NOMBRE COMÚN: Ocote, Pinabete, Pino blanco, Pino hayarín, Pino real. Farjon, *et al.*, 1997.

DESCRIPCIÓN:

El fuste es un tronco recto de de altura de 20 m con diámetros altura de pecho de 30 a 50 centímetros. Martínez (1992) (Farjon, *et al.*, 1997) menciona alturas que van de los 20 a 45 metros con diámetro altura de pecho (dap) de 80 a 100 centímetros. La altura de esta especie en la (SLP) según Reyna (2004) es de los 8 a 12 m (Figura 7). Esta especie en forma natural se encuentra a una altura de 2.200 m y por los continuos incendios forestales se han perdido la mayoría de individuos, pero cabe mencionar que existen plantaciones en altura a partir de los 1.500 m, y presentan un rápido crecimiento en altura con respecto a otras especies, pero son muy susceptibles a insectos de brotes y yemas.

Su corteza es algo áspera de 2 cm de espesor de una color rojizo y escamosa, la cuál se encuentra dividida por placas irregulares y con ramas extendidas, agrupadas en la parte superior del tronco (Martínez, 1992). Las placas presentan fisuras y profundas y con el tiempo se vuelven gris-café (Farjon, *et al.*, 1997).

Las ramillas son morenas con tintes rojizos y muy ásperas, debido a la persistencia de la base de las brácteas, las cuales son anchas, brillantes, salientes y contiguas. Se descaman fácilmente (Martínez, 1992). Presentan 5 acículas, raro 4 ó 6 desde 22 a 35 cm de longitud y 0,7 a 1,2 mm de ancho, rectas, laxas o en algunas ocasiones más rígidas (Farjon, *et al.*, 1997).

Los conos largamente ovoides (Martínez, 1992), solitarios o en verticilos de 3 a 4 en pedúnculos fuertes y recurvados que caen junto con el cono, ovoides-oblongos, con frecuencia ligeramente curvados de 7 a 10 (-14) x 5 a 7 (-12) cm cuando abren (Farjon *et al.*, 1997). Los conillos son morenos violáceos, erguidos, oblongos, subterminales algo atenuados en ambas extremidades, romos, generalmente en grupos de tres, con escamas gruesas, armadas de puntas extendidas o dirigidas hacia el ápice (Martínez, 1992).

Sus semillas oscura, casi ovoide de unos 5 mm con ala de 25 mm de largo por unos 8 de ancho, de color moreno (Martínez, 1992). Otra característica sobre su tamaño es de 4 a 5 x 3 a 3,5 mm frecuentemente con puntos oscuros, ala articulada de 18 a 24 x 7 a 9 mm, y translúcidas (Farjon, *et al.*, 1997).

Conforma pinares, bosque de pino y encino de montaña, en zonas moderadamente calientes a templadas (Farjon, *et al.*, 1997).

Se le localiza en México principalmente en Jalisco, Michoacán, México y al Norte de Morelos, extendidos al Norte de Nayarit y hasta la zona limítrofe de Sinaloa y hacia el este de Durango, también se encuentra en los estados de Guerrero y Oaxaca (Farjon *et al.*, 1997). Se le puede encontrar a una altitud desde los 1.100 a 1.400 y de los 2.500 a 2.700 m (Farjon, *et al.*, 1997). Esta especie se aprovecha para leña o postes (Reyna, 2004).



Plantación de *Pinus douglasiana* Martínez (muestra 5).

Figura 7. Detalles de *Pinus douglasiana* Martínez

***Pinus devoniana* Lindley.**

FAMILIA: PINACEAE

Subfamilia: Abietíneas

Género: *Pinus*

Especie: *devoniana* Lindley

NOMBRE COMÚN: Pino blanco, Pino lacio, Pino prieto. Farjon *et al.*, 1997. Ocote, escobetón, Reyna, 2004.

DESCRIPCIÓN:

El fuste del árbol (Figura 8) es de tamaño medio con tronco recto, algunas veces de 20 a 30 m. Con diámetros a la altura de pecho (dap) de 80 a 100 cm frecuentemente con pocas ramas, pero persistentes. De acuerdo a Reyna (2004) esta especie presenta para la Sierra de la Primavera (SLP) alturas que van de 10 a 15 m (Figura 17).

La corteza es gruesa en el tronco, escamosa, con placas alargadas y divididas por fisuras profundas y de color café y las fisuras más oscuras.

Sus ramillas muy gruesas entre 15 a 20 mm, curvadas hacia arriba, muy rugosas con largas bases en la base de las hojas (de los fascículos), por lo general se desarrolla solamente una ramilla por verticilo; fascículos ampliamente extendidos o ligeramente flácidos, persistiendo de 2 a 3 años.

Presenta 5 Acículas, raramente de 4 a 6 de los fascículos muy largas, de hasta 40 mm, resinosas, acículas muy largas de 17 hasta los 45 cm de longitud y de 1,1 a 1,6 mm de ancho de color brillosos. Sus conos son largamente ovoides (Martínez, 1992), solitarios o en verticilos de 2 a 4 en pedúnculos gruesos y cortos, caen al año que se sueltan las semillas dejando escamas en las ramillas generalmente largos, frecuentemente curvos de 15 a 35 x 8 a 15 cuando abren (Farjon *et al.*, 1997). Los conillos son morenos violáceos, erguidos, oblongos, subterminales algo atenuados en ambas extremidades, romos, generalmente en grupos de tres, con escamas gruesas, armadas de puntas extendidas o dirigidas hacia el ápice (Martínez, 1992). Con semillas de color oscura, casi ovoide de unos 5 mm con ala de 25 mm de largo por unos 8 de ancho, de color moreno (Martínez, 1992). Otra característica sobre el tamaño de la semilla es de 8 a 10 x 5 a 7 mm (Farjon *et al.*, 1997).

Esta especie conformando pinares, bosque de pino o de pino-encino de montañosos y relativamente abiertos (secundarios), es una especie mayor pionera que *P. montezumae* y frecuentemente se asocia con *P. oocarpa* en áreas de disturbio (Farjon *et al.*, 1997).

La distribución en México es Nayarit, Jalisco, Aguascalientes, San Luis Potosí, Querétaro, Hidalgo, Michoacán, México, D.F. Morelos, Tlaxcala, Puebla, Veracruz, Guerrero, Oaxaca, Chiapas (Farjon *et al.*, 1997). Se localiza desde los 700 a 900 y de los 2.500 a 3.000 m (Farjon *et al.*, 1997).

Se aprovecha esta especie para leña o postes (Reyna, 2004).



Plantaciones.



Presencia de conillo de primer año.



Presencia de conos de segundo año.

Figura 8. Detalles de *Pinus devoniana* Lindley.

***Rhynchelytrum repens* (Willd.)**

FAMILIA: GRAMINACEAE

NOMBRE COMÚN: River red gum

Especie: *camaldulensis*

DESCRIPCIÓN:

Es una planta perenne (Figura 9), hermafrodita de tallos erectos y delgados que pueden presentar alturas de un metro. Sus hojas son angostas, envainantes y planas con disposición alterna. Su flor es púrpura a rosado con espiguillas cortas y con frutos Cariopsis.

Es una especie ruderal que se encuentra a orillas de caminos y como componente de la vegetación secundaria. Es nativa de África. Sus usos son únicamente Ornamentales. Su floración se presenta en Junio a Octubre (<http://ine.gob.mx>).



Áreas de pastizales.



Inicio de floración.



Etapas de floración.

Figura 9. Detalles de *Rhynchelytrum repens* (Wild).

***Clethraceae rosei* Britton**

Clase Dicotyledoneae

FAMILIA: CLETHRACEAE

Género: *Clethra*

Especie: *rosei* Britton

NOMBRE COMÚN: Malvaste o Flor de Tila. Reyna, 2004.

DESCRIPCIÓN:

Familia Clethraceae

Árboles y/o arbustos (Figura 10) con hojas simples, alternas, sin estípulas. Para la Sierra de la Primavera presenta alturas de 5 a 10 m con diámetros de 20 a 60 cm. Su corteza es de color pardo, semirrugosa y caediza. Hojas de forma ovada a elíptica de 6 a 20 cm de largo y de 4 a 10 de ancho de textura cortonada, de color pardo verdosa el haz y el envés de color verde oliva a dorado (Reyna, 2004). Sus flores son pequeñas de corolas blancas las que se encuentran dispuestas en racimos de 18 a 20 de largo (Sánchez, 1976) o crema de 4 a 6 cm de largo, el fruto lo conforma una cápsula de tres valvas de 2 a 3 mm. De diámetro y sus semillas ovadas de 1,5 a 2 mm de longitud (Reyna, 2004), además las hojas son actinomorfas, hermafroditas, completas, arregladas en racimos terminales. Cáliz sinsépalos profundamente 5-partido. Corola de 5 pétalos de prefloración imbrica. Con estambres de 10 a 12, con los filamentos pubescentes o glabros, libres; anteras sagitadas, biloculares, dehiscentes por poros apicales. Ovario súpero, tricarpelar, trilobular, con muchos óvulos de placentación axilar, estilo uno, estigma trilobulado. Con fruto capsular, dehiscente por 3 valvas (Sánchez, 1976).

Esta especie para la SLP florece de Abril a Junio y fructifica de Julio a Agosto. Las flores se utilizan para cocimiento de té. Su leña se emplea para leña y fabricación de carbón (Reyna, 2004).



Rodal natural.



Etapas de fructificación.

Figura 10. Detalles de *Clethra rosei* Britton.

***Verbesina greenmanii* Urb.**

FAMILIA: COMPOSITAE

Género: *Verbesina*

Especie: *greenmanii* Urb.

NOMBRE COMÚN: Capitana, Capitaneja (Reyna, 2004).

DESCRIPCIÓN:

Son arbustos que van de 1 a 4 m de altura, con tallos de hasta 15 cm de diámetro (Figura 11), con hojas sobre el tallo (caulinares) de forma pinnatífida con la base alada, de 25 a 40 cm de largo. Las hojas jóvenes con apariencia plateada, en su envés presentan una apariencia glauca y su haz en hojas viejas son ásperas. Con inflorescencia terminal de 20 a 30 cm de altura, densas y agrupadas en corimbos de 5 a 25, delgados. Las flores de 6 a 9 mm de largo de color amarillo, fruto subgloboso de 8 a 12 mm de diámetro de color gris y presentan dos alas comprimidas (Reyna, 2004).

Florece en la región de Enero a Febrero y fructificando en el mes de Marzo. Se utiliza como alimento para el ganado y las inflorescencias secas se tiñen y se venden como artesanías navideñas (Reyna, 2004).



Etapa de floración.



Vegetación secundaria.

Figura 11. Detalles de *Verbesina greenmanii* Urb.

### ***Pinus halepensis* Miller**

FAMILIA: PINACEAE

Género: *Pinus*

Especie: *halepensis* Miller

NOMBRE COMÚN: Pino Carrasco.

DESCRIPCIÓN:

Árbol (Figura 12) de hasta 20 m, en el desarrollo del árbol en un inicio su copa es globosa apuntada o piramidal con ramas desde la base, posteriormente toma una forma irregular.

Sus hojas son aciculares de 6 a 12 cm x 0,07 a 0,1 cm de ancho en fascículos de dos. De color verde claro y flexibles. Su cono es oblongo, pedunculadas castaño rojizas, durando varios años en el árbol. Puede florecer desde el mes de Febrero a Mayo, presentando una madurez del cono en el segundo año en la estación de otoño ([www.rjalcala.com/fdc8.htm](http://www.rjalcala.com/fdc8.htm)).

En las repoblaciones de esta especie es mayor en zonas elevadas con precipitaciones totales de invierno y primavera, con temperaturas medias del mes más frío próximas a los 8 °C y las del mes más cálido no son demasiadas altas. Desde el punto de vista edáfico prefieren suelos con texturas de 40 % en arena y limo y con pH próximo a la neutralidad (Alía *et al.*, 1999).

Esta especie es la más representativa del género *Pinus* y se encuentra en zonas litorales del mediterráneo formando un complejo con las especies *Pinus brutia* y *P. eldarica* que son de gran importancia en toda la cuenca del mediterráneo (Alía, *et al.*, 1999).

Desde el punto de vista ecológico es la especie de pino del mediterráneo más frugal, que puede encontrarse en condiciones de clima y suelo donde no se encuentre otra especie arbórea. Por lo que esta excepción ha permitido que esta especie se utilice frecuentemente para restaurar la cubierta forestal. Encontrándose en suelos muy pobres y las mejores calidades como de crecimiento que las alcanza en terrenos con mayores precipitaciones y no muy calizos (Alía *et al.*, 1999). Presenta gran adaptación en áreas con alta aridez. Presenta una alta resistencia a la sequía. Forma piso entre los restos de los pinos y las sabinas ([www.rjalcala.com/fdc8.htm](http://www.rjalcala.com/fdc8.htm)).

Otro punto a considerar es que las áreas arboladas de esta especie se consideran como una especie de gran valor ornamental y socio recreativo ([www.rjalcala.com/fdc8.htm](http://www.rjalcala.com/fdc8.htm)). Además se utiliza con fines de protección quedando en segundo término la producción, ya que presenta un rendimiento muy bajo de 1 m<sup>3</sup>/ha/año, presentándose un turno de 80 años. Por lo que las actividades de la silvicultura son muy reducidas y se limita solamente a operaciones de limpieza para evitar los incendios forestales. Esta especie presenta una escasa variación genética a nivel general, aunque se presentan entre poblaciones diferencias en cuanto a crecimiento, resistencia a la sequía y frío (Alía *et al.*, 1999). Forma muy poco humus y es muy inflamable y presenta un gran poder colonizador. Se encuentra en una distribución altitudinal desde el nivel del mar hasta los 1.600 m. No requiere riegos ya que tolera precipitaciones menores a 250 mm. Puede soportar temperaturas desde los 0 y 3 °C y entre los 18 y 26 °C en Agosto.

Su distribución natural es la región mediterránea en España (Baleares y mitad este de la península, así como al oeste de Portugal) ([www.rjalcala.com/fdc8.htm](http://www.rjalcala.com/fdc8.htm)).

Esta especie no se presenta de forma natural en la (SLP), pero se presenta esta especie debido al establecimiento de parcelas de monitoreo en el Campo Experimental Bosque Escuela (Figura 16), ya que esta especie fue introducida en programa nacional en los 80 como una especie resistente a la sequía y con pocos requerimientos nutricionales.



Figura 12. Detalles del rodal de monitoreo de *Pinus halepensis* Miller.

***Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. var. *camaldulensis* (sin. *E. rostrata* Schlecht.)**

FAMILIA: MYRTACEAE

Especie: *camaldulensis*

NOMBRE COMÚN: River red gum

DESCRIPCIÓN:

Es la especie (Figura 13) de mayor distribución continental en Australia a excepción de Tasmania. Pueden encontrarse tanto en zona meridional como tropical. En Australia presenta alturas de 25 a 50 m el tronco en muchas procedencias es bastante torcido, la conformación de la copa es rala, su corteza es el tipo red gum de lisa a placas. Las hojas juveniles aovadas a anchamente lanceoladas, pecioladas, pecíolos cuadrangulares. En cambio las hojas adultas son pecioladas, lanceoladas, delgadas y pendientes. La madera es roja, textura cerrada, resistente a las termitas. Los usos en los que se emplea es para la miel, cortinas de abrigo, la madera aserrada se le dan varios usos como lo son carbón vegetal, madera para durmientes, etc. (FAO, 1981).

Se encuentra a una distribución altitudinal entre los 30 m hasta los 600 m. Con precipitaciones de invierno y verano entre los 250 a 625 mm. Con estaciones secas de 4 a 8 meses o más, comúnmente rigurosos (FAO, 1981).

En México fueron introducidos posterior a los años 40 fueron establecidos como especies ornamentales, urbanas en camellones, ceras, parques en muchas ciudades del país, pero por su estabilidad presenta grandes problemas debido a caídas de arbolado por su altura que supera los 25 m. Ocasionado por los fuertes vientos y su mal anclaje. Pero en el año 2000 fue introducida una plaga exótica *Glycaspis brimblecombei* que provocaba la caída prematura del follaje y posteriormente su muerte, por lo que provoco una fuerte pérdida de vegetación urbana y fue necesario la introducción de una avispa para su control biológico (Iñiguez et al., 2001).



Figura 13. Detalles de plantaciones de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. var. *Camaldulensis*.

***Pinus pseudostrobus* Lindl.**

FAMILIA: PINACEAE

Subfamilia: Abietíneas

Género: *Pinus*

Especie: *pseudostrobus* Lindl.

DESCRIPCIÓN:

Es un árbol (Figura 14) con alturas de 15 a 25 m y en algunas ocasiones mayores, sus ramas extendidas y verticiladas con su corteza lisa durante mucho tiempo. En la vejez áspera y agrietada; ramillas delgadas y frágiles con largos entrenudos de color café rojizo y en sus partes tiernas con una tonalidad de tinte azulado. La base de las brácteas son espaciadas y frecuentemente adheridas a las ramillas y una apariencia que se encuentran sumergidas en ellas (Martínez, 1992).

Las hojas se presentan en grupos de 5, con una longitud de 17 a 24 cm de largo, muy delgadas, triangulares y flexibles de color verde intenso y en ocasiones con ligero tinte amarillento a glauco, finamente aserrada, con los dientecillos uniformes. Presenta 3 canales resiníferos, a veces 2 medios, rara vez con uno externo o interno. Con 2 haces fibrovasculares muy aproximados y generalmente poco distintos. Su hipodermo casi uniforme o con ligeras entrantes en el clorénquima con 2 o 3 hileras de células gruesas e irregulares, las paredes exteriores de las células endodérmicas son engrosadas. Los conos son de forma ovoide o largamente ovoides de 8 a 10 cm o mayores, de color café claro, amarillento o morenos, extendidos y muy levemente encorvados, un poco asimétricos, generalmente por pares, no pronto caedizos, sobre pedúnculos de 10 a 15 mm (excepcionalmente hasta 23 y en ocasiones casi sésiles). Frecuentemente el pedúnculo queda en la ramilla conservando algunas escamas basales. Los conillos son oblongos largamente pedunculados, oscuros con gruesas escamas de puntas romas. Sus escamas son delgadas, duras, desiguales de 3 a 3,5 cm de largo por 1,5 a 1,8 de ancho, con ápice anguloso; umbo irregular cuadrangular, quilla transversal por lo común baja y poco marcada, con costilla perpendicular poco visible, apófisis aplanada, en ocasiones saliente y redondeada, cúspide pequeña, deprimida, provista de una punta cónica, frágil y persistente. Sus semillas son vagamente triangulares, oscuras de unos 6 mm, con ala de unos 23 mm de largo por 6 a 9 mm de ancho. Produce abundante trementina y la madera es dura y resistente. Se localiza en climas templados y frecuentemente se ve asociado con *P. montezumae* con el que presenta un estrecho parentesco. Se distribuye en los estados de Nuevo León, Jalisco (Tuxpan, Manantlán), Michoacán, Estado de México, Morelos, Veracruz, Oaxaca, Guerrero, Chiapas (Maximino, 1992).

Esta especie no se presenta de forma natural en la (SLP), pero se presenta la especie debido al establecimiento de parcelas de monitoreo en el Campo Experimental Bosque Escuela.



Figura 14. Detalles de plantaciones de *Pinus pseudostrobus* Lindl.

***Quercus magnoliifolia* Née.**

FAMILIA: FAGACEAE

Género: *Quercus*

Especie: *magnoliifolia* Née.

NOMBRE COMÚN: roble, roble amarillo (Reyna, 2004), encino-roble, encino amarillo, encino naps (González, 1986).

DESCRIPCIÓN:

Árbol (Figura 15) de 5 a 10 m de altura con una copa redondeada, para zonas de montaña cercanas a la costa pueden encontrarse alturas de 15 a 20 m con diámetros de 30 a 60 cm hasta llegar a 1 m (González, 1986). También se reportan alturas de 5 a 10 m con diámetros de 20 a 80 cm para la (SLP) (Reyna, 2004).

Sus ramillas de 2 a 5 cm de diámetro estriadas longitudinalmente pero no muy marcadas. En las hojas verdes se presenta el haz de color verde, por lo general copiosamente pubescente con pelos cortos simples, vermiformes, glandulares, rojizos o de color ámbar y con un tomento esparcido estrellado-pubescente, en cambio su envés es tomentoso, glandular principalmente cerca de las nervaduras, las hojas maduras son muy grandes y tiesas, con su envés pálido-tomentoso, muy amplias y un tanto estrechamente obovadas, rara vez elípticas de 5 a 25 cm de largo, pudiendo presentarse en las más grandes de los 30 a los 40 cm de largo, con 4 a 25 de cm de ancho, un tanto abruptamente angostadas a ampliamente redondeadas, ápice obtuso y subagudo de la parte media de la hoja hacia la base gradualmente angosta y terminada en punta.

Ápices callosos o cortamente mucronados, pero el mucrón por lo general doblado hacia abajo junto con el borde resolutivo, nervaduras de 10 a 20 en cada lado, ascendentes, generalmente rectas pasando hasta los dientes cuándo éstos están presentes, las otras nervaduras se anastomosan ceca del borde; haz duro, lustroso, casi glabro, con frecuencia pubescente en la base de la nervadura central y con pequeños pelos estrellados dispersos, las nervaduras primarias notablemente impresas, en cambio las secundarias generalmente impresas y la hoja evidentemente rugulosa, las nervaduras más pequeñas pálidas y ligeramente elevadas, el envés pálido tomentoso, los pelos sésiles, sobrepuestos, generalmente cubren el color verde de la hoja, la epidermis papilosa, ampollosa y glandular-puberulenta, nervaduras primarias y secundarias bien marcadas, el retículo elevado, las nervaduras más finamente solamente visibles como pequeñas líneas deprimidas entre las ampollas, pecíolos de 2 a 15 mm de largo, glabrescentes o persistentemente pubescentes por lo menos en la cara interna. Las flores femeninas en pequeños grupos o solitarias, dispersa sobre un pedúnculo glabrescente de 5 a 10 mm de largo; su fruto es anual, la cúpula hemisférica de 15 a 25 mm. de ancho, bellota ovoide de 20 hasta 40 mm de largo y de 10 a 25 mm de diámetro con pared delgada, cuando secas arrugadas, excepto cuando están completamente maduras, cerca de una tercera parte de su largo incluida en la cúpula (González, 1986).

En México es una especie que se encuentra en Sinaloa, Nayarit, Jalisco, Colima Michoacán, Guerrero, Oaxaca y América Central. Se le puede encontrar a una distribución altitudinal de los 300 a 2.600 m.

La especie se distribuye ampliamente en Jalisco, la madera se utiliza como leña, carbón posterior y horcones, el follaje empleado para techos rústicos de viviendas de campo. La especie se comporta como árbol en condiciones óptimas. Al NE del estado de Jalisco presentan un porte arbustivo y forma de matorral con alturas que van de los 3 a 5 m. En bosques mesófilos de montaña alcanza grandes tallas y convive con frecuencia con *Q. resinosa* por lo que en algunos lugares presentan hojas con características comunes que indudablemente son híbridos de ambas especies (González, 1986).



Figura 15. Detalles de un bosque natural de *Quercus magnoliifolia* Née.





A decorative graphic consisting of a vertical blue line on the right, a horizontal blue line at the bottom, and a horizontal yellow line above the title. Two squares are positioned in the upper right: a white square with a black border and a yellow square with a yellow border, overlapping each other.

**3**

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. Descripción del área de estudio

La investigación se realizó en una zona al suroeste en la Sierra de la Primavera (Figura 16) y denominado como Campo Experimental Bosque Escuela (CEBE). Este Campo Experimental está gestionado bajo el régimen de concesión al Departamento de Madera, Celulosa y Papel (DMCyP) del Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías (CUCEI) de la Universidad de Guadalajara en Jalisco (México). En la Figura 16 se puede observar gráficamente la distribución de las diferentes formaciones vegetales existentes en el mismo.

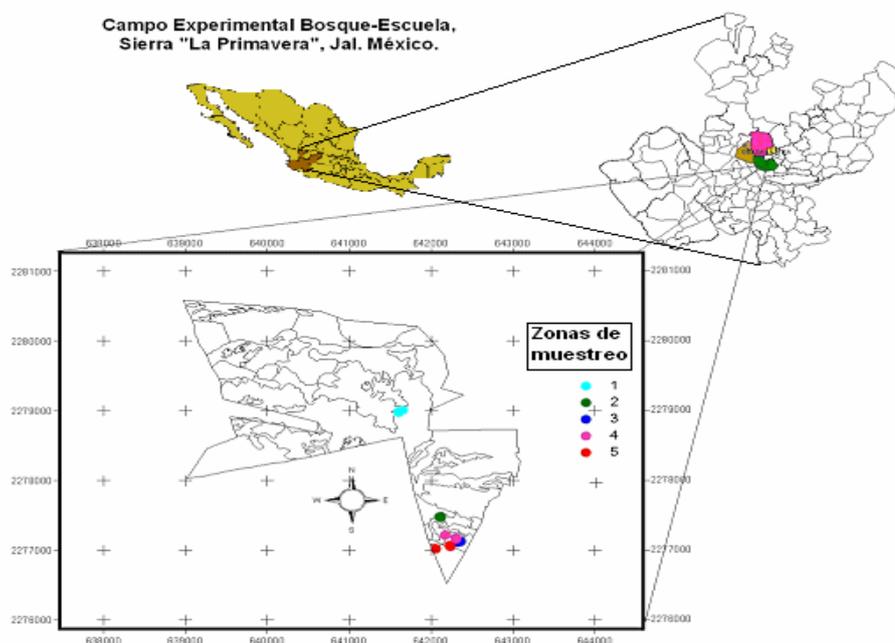


Figura 16. Tipos de vegetación del Campo Experimental Bosque Escuela.

La Sierra de la Primavera (SLP), conformada por cinco tipos de vegetación principales, está declarada como Área Natural Protegida de flora y fauna. Este área presenta una superficie total de 36.000 ha (Semarnat, 2000). La altitud media del Bosque Escuela varía entre los 1.350 y los 1.580 m, mientras que para la SLP se ha determinado mediante sistemas de información geográfica en cartas digitales de cartografía que la variación fisiográfica se manifiesta en un rango altitudinal comprendido entre los 1.400 y los 2.270 m, con 35 facetas fisiográficas diferentes, como se muestra en la Figura 18, correspondiente al modelo de elevación digital de la zona.

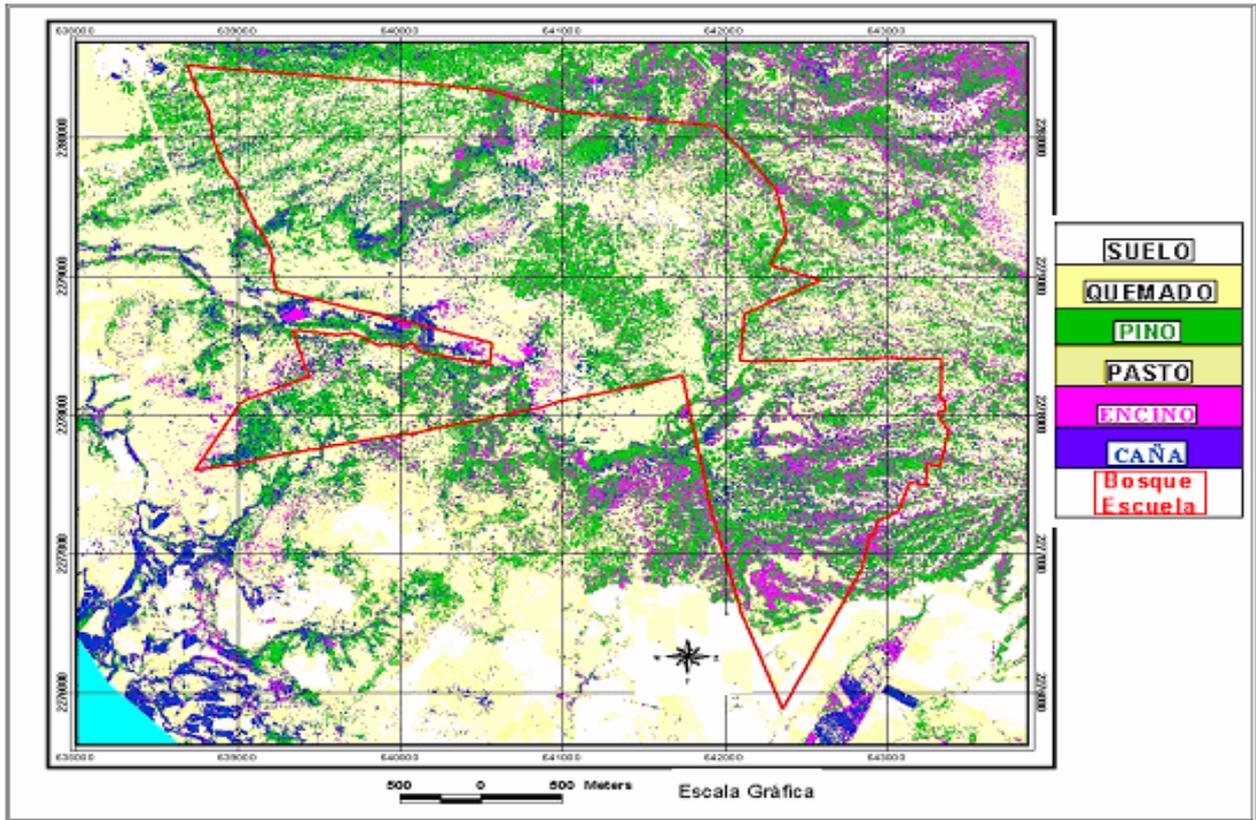


Figura 17. Tipos de vegetación del Campo Experimental Bosque Escuela.

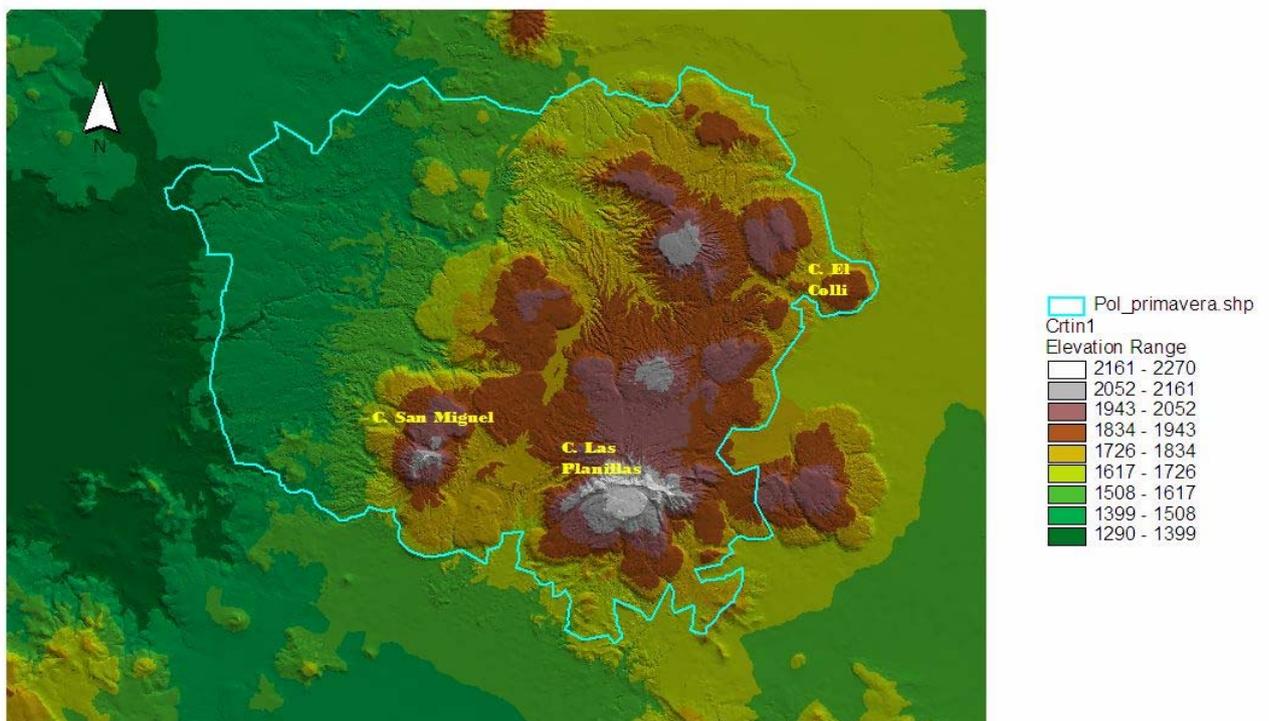


Figura 18. Mapa del modelo de elevación de la Sierra de la Primavera.

### 3.1.1. Geología, topografía e hidrogeología de la zona

Su estructura geológica la conforman rocas ígneas extrusivas como la riolita, o la obsidiana y pómez. Los suelos en su mayoría son Regosol districo y no eutrico o feozom háplico como se suponía.

La topografía en la zona es muy accidentada con abundantes mesetas, valles y zonas planas con pendientes que van desde el 0 al 85 %.

Su hidrología dentro del Bosque Escuela se presenta en una serie de arroyos temporales, así como permanentes, entre los que destacamos El Taray, Las Presitas y Agua Caliente.

### 3.1.2. Vegetación

En el Bosque Escuela (Rodríguez *et al.*, 1992) se presentan varios tipos de vegetación entre los que destacamos los bosques de encino-pino, matorral subtropical, pastizal natural, vegetación acuática, vegetación subacuática y vegetación secundaria.

### 3.1.3. Clima

El clima de acuerdo a la clasificación de KÖPEN y modificado por Enriqueta García pertenece al subgrupo climático (A) C (Templado Cálido). Se establece que el Área Natural Protegida Bosque la Primavera presenta rangos de temperatura promedio de 18,6 °C con una amplitud cuadrática de 5,9 °C, mientras que en la zona urbana se presenta en promedio una temperatura de 20,8 °C con una amplitud cuadrática de 5,3 °C (Díaz, 2004).

Los efectos climáticos que determinan las variaciones de temperatura (Figura 19) también afectan de manera sustantiva a las características de la precipitación, especialmente a los ciclos interestacionales, ya que es muy notable el cambio de rango entre las gráficas que representan la época de sequía y la de lluvias, y a pesar de presentarse en éstas los rangos en escala logarítmica para evitar las enormes diferencias que se presentan debido a la alta movilidad de la media y de la amplitud cuadrática promedio mensuales (Díaz, 2004).

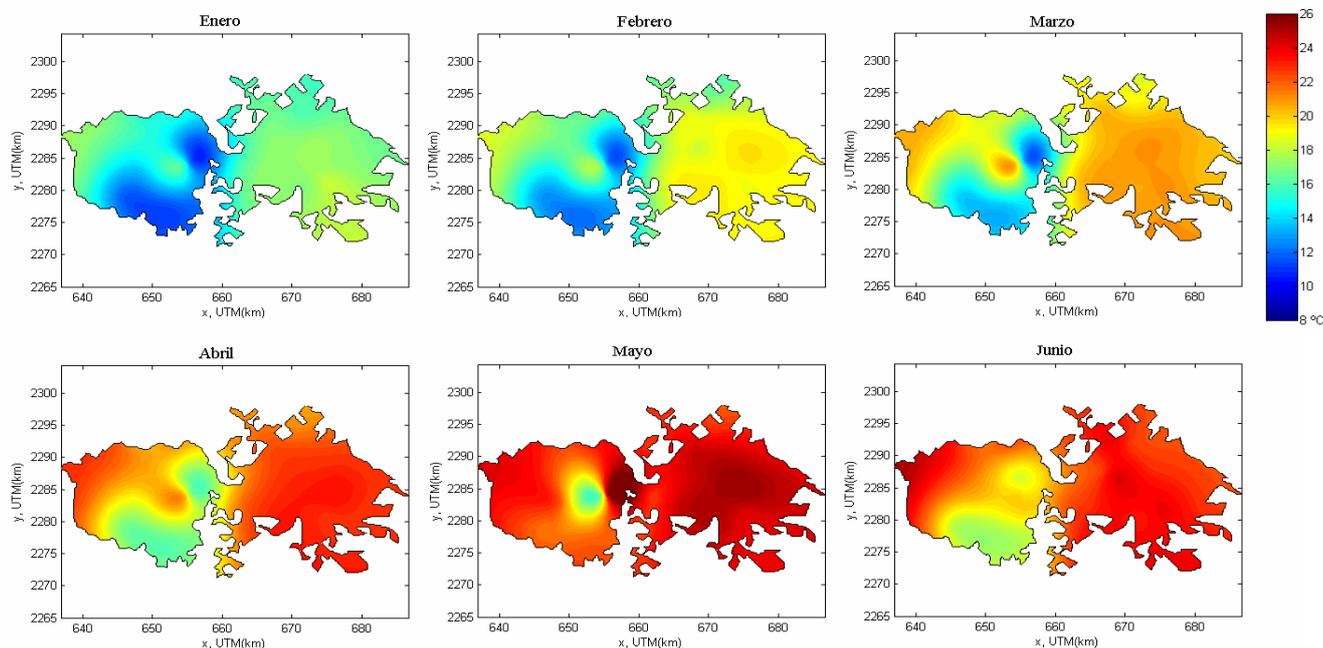


Figura 19. Distribución espacial de temperatura promedio mensual en la zona de estudio (Díaz, 2004).

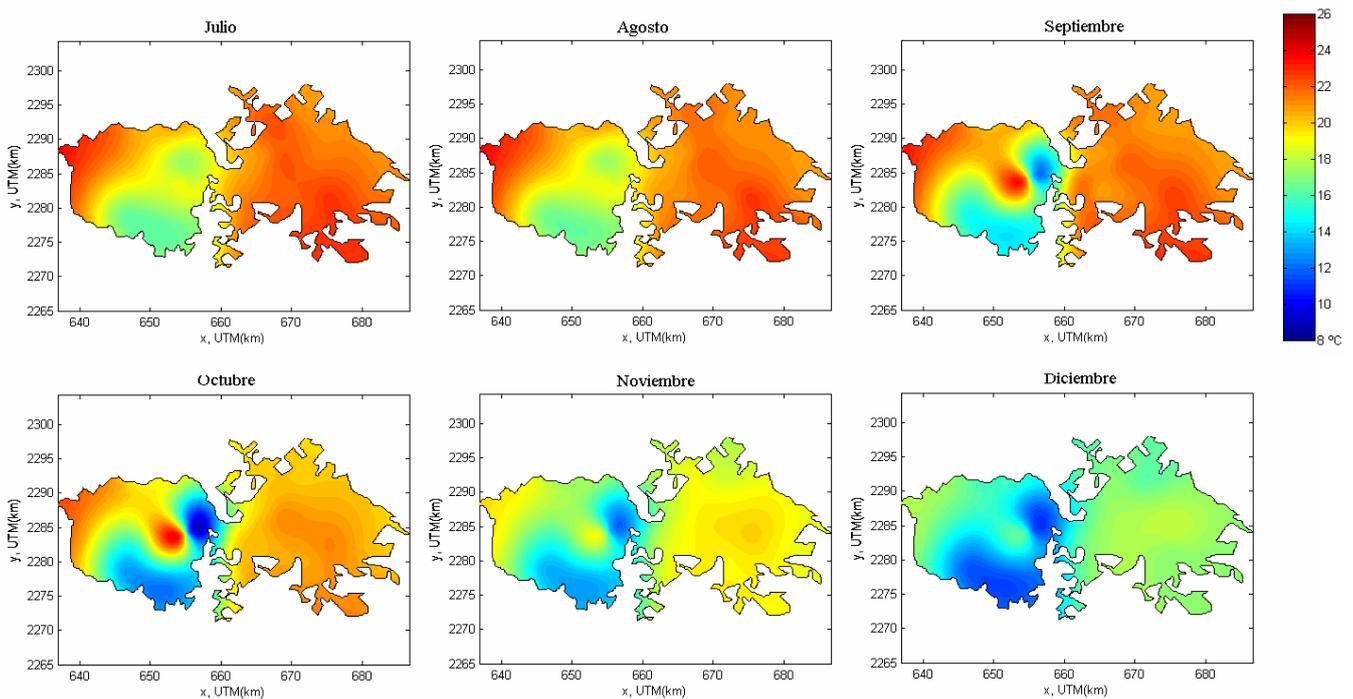


Figura 19 A. Distribución espacial de temperatura promedio mensual en la zona de estudio (Díaz, 2004).

Para realizar el trabajo se eligieron las especies de mayor importancia, más representativas y que estén mayormente involucradas en los incendios forestales dentro de la Sierra de la Primavera.

La primera parte del estudio fue considerar un área que contara con todos los tipos de vegetación presentes en la Sierra de la Primavera. En el Campo Experimental Bosque Escuela de la Sierra de la Primavera predominan los árboles, arbustos y herbáceas que se encuentran mayoritariamente dentro de la Sierra. Los géneros más dominantes dentro de las especies arbóreas son *Quercus*, *Pinus*, *Clethra*, *Acacia* (Villavicencio, 1992). Para el estrato herbáceo las de mayor dominancia corresponde a las compuestas con el 29 %, *Leguminosae* 19 %, *Graminacea* 16 %, *Solanaceae* 13 %, *Orchidaceae* 6 %, *Malvaceae* 5 %, *Lablatae* 4 %, y *Moraceae* y *Fagaceae* con el 3 % (Rodríguez, 1992).

### **3.2. Técnica de muestreo**

Para la identificación de especies se recurrió al herbario del Departamento de Madera, Celulosa y Papel, así como del Instituto de Botánica de la Universidad de Guadalajara. Para la evaluación calorimétrica y los ensayos de inflamabilidad se consideraron las especies que se muestran en la Tabla 8. En esta parte del estudio se tomó muy en cuenta la fenología de cada especie y su importancia en los incendios forestales.

Para su identificación correcta, durante la realización de la recogida de cada una de las especies se les clasificó con un número que se mantuvo fijo en los muestreos mensuales o estacionales. Además se recurrió a estudios de vegetación anteriormente realizados ya en la zona (Rodríguez, 1992).

Muestra	ESPECIE
M1	<i>Pinus oocarpa</i> Schiede ex Schlechtendal (Bosque Pino - encino) **
M2	<i>Acacia pennatula</i> (Schlecht & Cham.) Benth. (Vegetación secundaria) **
M3-Zona seca	<i>Quercus resinosa</i> Liemb. (Bosque Pino - encino) **
M4	<i>Pinus oocarpa</i> Schiede ex Schlechtendal (Plantación) **
M5	<i>Pinus douglasiana</i> Martínez (Plantación) **
M6	<i>Pinus devoniana</i> Lindley (Plantación) **
M7	<i>Rhynchelytrum repen</i> Willd
M10-Zona Húmeda	<i>Quercus resinosa</i> Liebm. (Bosque Pino - encino) **
M11	<i>Clethra rosei</i> Britton (Bosque Pino - encino) **
M13	Estiércol de ganado *
M14	<i>Verbesina greenmanii</i> Urb. (Vegetación secundaria) **
M18	<i>Pinus halepensis</i> (Right) (Plantación)**
M19	<i>Eucalipto camaldulensis</i> Dehn. (Plantación) **
M20	<i>Pinus pseudostrobus</i> Lindley var. <i>Pseudostrobus</i> form. <i>Pseudostrobus</i> (Plantación) **
M20s	<i>Sustrato seco de P. devoniana</i> Lindley (Plantación) **
M21	<i>Pinus devoniana</i> Lindley (Plantación) **
M22	<i>Acacia pennatula</i> (Schlecht & Cham.) (Vegetación secundaria) **
M 24	<i>Quercus magnifolia</i> Née ***
* Análisis individual	
** Análisis entre especies (Análisis 2005)	

Tabla 8. Evaluación de especies forestales.

### 3.2.1. Premuestreo del material colectado

Para el muestreo y la interpretación de la Cartografía para el uso del suelo se empleó la metodología de trabajo de Guías (INEGI, 1989). Para ello se contó con un vuelo aéreo infrarrojo realizado en 1984 en el Campo Experimental Bosque Escuela, el que constaba de 15 fotografías, con la cuál se realizó una ortofoto. Se realizaron recorridos en campo para la fotointerpretación y la recogida de material de cada especie como son hojas, flores y frutos. A continuación tanto en campo como en laboratorio se realizó su identificación.

Se rodalizaron las estructuras vegetales en la ortofoto (fotografía aéreas que han sido corregidas digitalmente para presentar una proyección ortogonal) y se comparó con una imagen QuickBird 2002 con la finalidad de establecer posibles cambios en la vegetación durante el periodo comprendido entre 1984 y 2002, detectándose cambios únicamente en áreas que han sido reforestadas. Por lo que se seleccionaron 5 áreas (Figura 17) que contarán con la mayor dominancia de especies presentes en la región y con los diferentes tipos de vegetación, tal como son bosques pino-encino, vegetación secundaria y áreas de plantaciones.

El trabajo se realizó en dos fases:

1. La primera de ellas se consideró una porción al suroeste de la Sierra de la Primavera conocido como Campo Experimental Bosque Escuela (CEBE) y que abarca una superficie aproximada de 952,84 hectáreas. En esta zona se encuentran todos los tipos de vegetación representativos de la Sierra de La Primavera. Con el material vegetal recogido se realizó un análisis multifactorial con la finalidad de determinar si se presentan diferencias significativas entre las especies y estaciones de invierno del 2003 al verano del 2005 con respecto al valor calorífico.
2. Una segunda fase se realizó para las 30.500 ha restantes que conformar el área protegida de la Sierra de la Primavera para elaborar los mapas de riesgo de incendio mediante la información generada en el año 2008.

### 3.2.2. Recogida y Preparación del material vegetal colectado

La toma de muestras se realizó la última semana de cada mes a partir de agosto 2003. El proceso de toma de muestras fue para el año 2003 de 10 especies en Agosto, en el mes de septiembre no se muestreó, 13 especies para el mes de Octubre, 16 especies para Noviembre, y 17 especies para el mes de Diciembre. La toma de muestras continúa durante el año 2004 con 20 especies en Enero, en Febrero 24 especies, y a partir de Marzo inclusive, se tomaron muestras de 25 especies el resto de los meses del año. En el año 2005 el Dr. Lisardo Núñez Regueira<sup>+</sup> propuso realizar 3 muestreos para cada especie en el lapso del mes correspondiente a la parte central de la estación del año, debido a que en el muestreo mensual el resultado del poder calorífico superior entre una estación y la siguiente no presentaba diferencias significativas.

El material muestreado, y que clasificamos como combustibles forestales, corresponde a todo aquel material vegetal que por una fuente energética de contacto o cercana a él, tiene la posibilidad de ignición de acuerdo a la humedad del material. Existen dos tipos de combustible principalmente:

1. Los combustibles muertos son aquel material de origen vegetal que por cuestiones naturales, fenológicas o fisiológicas, o físicas mediante corte, ha sido retirado de la planta viva y ya no cumple las condiciones fisiológicas. Este material ha pasado a cubrir la superficie superior del suelo. Está habitualmente formado por hojas, acículas, ramillas y ramas, etc. Este material tiende a perder rápidamente su humedad siempre y cuando este muy en contacto con ciertas condiciones meteorológicas favorables de temperatura, radiación y viento.
2. Los combustibles vivos lo conforma todas aquellas partes vegetativas que cumplen aún con funciones fisiológicas del vegetal, tal como son hojas, acículas, herbáceas, pastos, arbustos y árboles.

La recogida del material vegetal o combustible vivo, se realizó siempre a partir del mismo árbol mediante un corte a una rama. Para ello se utilizó una pértiga extensible con una longitud de 1,50 a 5 m. Para el combustible seco o muerto, como es el caso de *Pinus devoniana* Lindley y el estiércol de ganado, se tomaron muestras de la parte superior del suelo forestal. Una vez recogida la muestra, y con la intención de minimizar al máximo pérdida de humedad, ésta se guardaba en bolsas herméticas de 26,8 x 27,9 cm y se transportaban al laboratorio en un tiempo menor a 6 horas. Una vez en el laboratorio la muestra se cortó inmediatamente a longitudes no mayores de 2 cm. Con cada muestra se tomaron 2 g con su respectivo duplicado para determinar la humedad del combustible. El procedimiento que se siguió está recogido en las normas TAPPI 264 om-88 inciso 8.2 y UNE 57-005-90 mediante la utilización de una estufa de secado marca Felisa digital a una temperatura de  $\pm 105$  °C por un tiempo de 8 h y por diferencia de peso en una balanza de precisión Sartorius con precisión 0.0001 g. El resto de la muestra se guardó en refrigerador para futuras comprobaciones.

Posteriormente se preparan muestras para determinar por triplicado el poder calorífico de las diferentes muestras utilizando un calorímetro de combustión de bomba en atmósfera de oxígeno Parr 1108.

La fórmula que se utilizó para determinar el contenido de humedad del combustible (Fuel Moisture Content, FMC) es empleada de forma habitual en el campo de los incendios forestales y es utilizada como índice más estándar para determinar el contenido de agua en los combustibles dentro de la prevención y la simulación de incendios (Blackmarr *et al.*, 1968; Olson 1980; Pool *et al.*, 1993; Rice *et al.*, 1985<sup>a</sup>; Simard, 1968; Van Wagner, 1967; Viney, 1991, Chuvieco *et al.*, 2004):

$$FMC = (P_h - P_s)/P_s \times 100$$

Donde  $P_h$  es el peso húmedo y  $P_s$  el peso seco.

### 3.3. Procedimiento de ensayo calorimétrico en calorímetro de bomba 1108 Parr

Para la determinación del poder calorífico superior de las muestras se realizaron 6 determinaciones para cada estación. Los ensayos se reparten:

1. En los años 2003 y 2004 un ensayo con su respectiva repetición (ra y rb).
2. En el año 2005 se realizaron tres determinaciones con su respectiva repetición, por lo que se contó.

Todas las medidas calorimétricas fueron realizadas bajo la normas UNE-23-103, ISO-1716 y NF-M-0-005 (Arnaldos *et al.*, 2004).

Tal y como comentamos antes para los ensayos de calorimetría se utilizó un calorímetro de bomba en atmósfera de oxígeno Parr 1108 (Figura 20 A). Previamente a la introducción de la muestra en el calorímetro, el material es secado en una estufa a 105 °C hasta llegar a peso constante. Cuando el material se encontraba completamente seco se procedía a cortarlo a longitudes menores de 2,0 cm.

Aunque para los ensayos calorimétricos las muestras no fueron transformadas en pastillas debido a que no se contaba con una prensa adecuada, en cada ensayo de combustión se comprobó que en el interior de la bomba no existieran residuos de material vegetal al terminar el ensayo calorimétrico asegurando así una combustión completa. De darse cualquier problema durante el ensayo se realizaba nuevamente la prueba. Las muestras que se utilizaron en los ensayos calorimétricos siempre fueron menores de 1 g (Figura 20 B). Una vez pesada la muestra, ésta se colocó en el crisol (Figura 20 C), agregando este conjunto en el interior de la bomba, y en la cual se añadiera anteriormente 1 ml de agua destilada.

Con el fin de asegurar la combustión adecuada, la muestra debe estar en contacto con el alambre de fusión. Cerrada la bomba se llena de oxígeno a una presión de unas 30 atmósferas. Llenada la bomba con oxígeno, se introduce en el interior de la chaqueta térmica, y que contiene 2000 ml de agua destilada. Posteriormente se conectan los electrodos del sistema de ignición con la bomba, se cierra la chaqueta, y se enciende el motor del agitador del agua de la chaqueta.

Posteriormente se esperan de 3 a 5 minutos para alcanzar un equilibrio térmico. Este proceso se realiza mediante observación visual, y para ello se contó con un termómetro externo (Figura 20 D). Cuando se presentan las condiciones adecuadas de equilibrio térmico se toma la primera lectura de la temperatura. Así se empiezan a tomar medidas a partir de este momento y cada minuto durante los cinco minutos posteriores, haciendo un total de 6 lecturas. Posterior a estas 6 lecturas se procede a presionar el botón de la unidad de ignición iniciando la combustión. A partir de la ignición se toman lecturas cada 15 segundos durante 5 minutos por lo que se tendrán un total de 20 lecturas. En los primeros 30 segundos de la ignición se observó un aumento rápido de la temperatura, por lo que se tuvo mucho cuidado de tomar bien las lecturas. En la última etapa se toman lecturas durante otros 5 minutos en cada minuto. En esta etapa se recupera la estabilidad de la temperatura.

Con la información tomada se determinan diferentes variables como:

- (b) tiempo, con exactitud de 0,1 minuto cuando la temperatura alcanza el 60 % de ascenso total.
- (c) tiempo al principio del periodo después del primer ascenso de temperatura, y en el cual el cambio de temperatura se ha hecho constante.
- ( $t_a$ ) temperatura en el momento de encendido, corregida por la escala de error del termómetro.
- ( $t_c$ ) temperatura corregida en el tiempo c.
- ( $r_1$ ) velocidad (temperatura/minuto) a la cual subió la temperatura durante el periodo de 5 minutos antes de la ignición.
- ( $r_2$ ) velocidad a la cual subió la temperatura durante el periodo de 5 minutos después del tiempo c.
- ( $e_1$ ) cantidad en ml de solución alcalina 0,0725 N.
- ( $c_3$ ) centímetros de alambre de fusión consumidos en la combustión.
- ( $e_3$ ) cuando se usa un alambre de fusión níquel-cromo Parr.
- (m) masa de la muestra en gramos.
- (t) calculo del asenso neto de temperatura.
- (Hg) calor de combustión bruto en  $\text{cal g}^{-1}$  y por último promedio de Hg de cada muestra.



Bomba calorimétrica Parr 1108



Peso de la muestra



Colocación de muestra y electrodos



Termómetro

Figura 20. Detalles del procedimiento para ensayos calorimétricos

### **3.3.1. Evaluación y determinación del poder calorífico de las especies forestales en la Sierra de la Primavera (Jalisco, México)**

Esta determinación final se realiza mediante un análisis factorial de los periodos de Agosto 2003 a Marzo 2004. Este análisis es de la colecta mensual de las especies analizadas mensualmente. Cada evaluación del poder calorífico se realizó por duplicado.

### **3.4. Ensayos de inflamabilidad de combustibles forestales**

En México no se había utilizado este tipo de ensayos de inflamabilidad de combustibles forestales con el epirradiador. Por esta razón se tuvo que utilizar para calibrar el epirradiador la norma española UNE 23-729-90.

El material vegetal colectado es llevado al laboratorio, sacado de las bolsas herméticas y cortado a longitudes no mayores de 10 cm de longitud. A partir de este material cortado se realizaron por cada especie y para cada estación solamente 25 ensayos y no 75 como se aconseja en algunos trabajos. La cantidad de muestra presentaba un peso menor de 1 g.

Los ensayos de inflamabilidad se realizan mediante un epirradiador con los procedimientos de operación marcados por las Normas UNE-23-721 y UNE 23-725, y utilizando el procedimiento de Valette (Proupín, 1998).

Para iniciar los ensayos fue necesario realizar algunas modificaciones del voltaje, ya que el para el funcionamiento del epirradiador se requiere un voltaje de 220 V y en América se cuenta con un voltaje promedio de 110 V, por lo que se tuvo que instalar una red eléctrica de 220 V. Además se instaló un controlador de voltaje para poder manejar el amperaje y contar con la potencia requerida del equipo a 500 W.

#### **3.4.1. Procedimiento para Ensayos de inflamabilidad**

Para cada experiencia se realizó el siguiente procedimiento:

1. Encendido del equipo durante unos 5 minutos para su estabilización. A continuación el material es depositado sobre el epirradiador tratando que el material estuviera esparcido sobre la superficie del epirradiador (Figura 21 A).
2. Al momento del contacto del material combustible con el epirradiador se inicia el conteo del tiempo de inflamabilidad (Figura 21 B). Para cada ensayo se limpió el epirradiador con la finalidad de no dejar residuos. Del resultado de las 25 muestras se utiliza la media aritmética de las inflamabilidades producidas.
3. Para considerar los ensayos positivos, estos deben de producir inflamación antes de 1 minuto.
4. Con los promedios obtenidos por estación para cada especie se recurrió a la clasificación de inflamabilidad de Valette, 1988 (Hernando, 1989; Proupín, 1998) tal y como se muestra en la Tabla 9.



Colocación de la muestra a evaluar



Combustible en etapa de inflamabilidad

Figura 21. Detalles del proceso de ensayos de inflamabilidad

Porcentaje de ensayos positivos						
Tiempo inflamabilidad (s)	100 a 95 %	94 a 90 %	89 a 85 %	84 a 80 %	79 a 50 %	< 50 %
Menor de 12,5	5	4	3	3	2	1
De 12,5 a 17,5	4	3	3	2	1	1
De 17,5 a 22,5	3	3	2	2	1	0
De 22,5 a 27,5	3	2	2	1	0	0
De 27,5 a 32,5	2	2	1	1	0	0
Más de 32,5	2	1	1	0	0	0

Tabla 9. Clasificación de las especies en función de su inflamabilidad.

Para interpretar los valores obtenidos de la anterior tabla, se elabora una nueva clasificación tal y como se muestra en la siguiente Tabla 10.

Inflamabilidad	Criterio
0	Muy poco inflamable
1	Poco inflamable
2	Inflamable
3	Moderadamente inflamable
4	Muy inflamable
5	Extremadamente inflamable

Tabla 10. Criterios de inflamabilidad.

### 3.5. Procedimientos para determinar los parámetros químicos elementales

Algunos autores americanos establecen que la inflamabilidad viene regida por la presencia de ciertos iones procedentes de determinados elementos y moléculas más elaboradas (Philpot, 1970; Hernando, 1989). Por lo tanto se establece que se debe realizar un análisis una vez por cada periodo estacional de la composición de todos los componentes físicos químicos, de la composición elemental, del porcentaje de humedad, de cenizas en bomba, y que evolucionan a través del año. Por esta razón se cuenta con una mayor veracidad de estas pruebas por lo que deben realizarse periódicamente en un margen de 6 años, para establecer un valor promedio de cada una de las variables.

Para determinar estos elementos se realizó el siguiente procedimiento:

1. Para la preparación de las muestras fue necesario realizar el molido de las mismas mediante un molino Retsch GmbH 5657 type SKI west Germany en el que se utilizaron dos tipos malla diferentes posteriormente de la muestra molida se paso a otro molino de balín.
2. Posteriormente se preparó la muestra para realizar las determinaciones de la composición química elemental, en la que se determinaron C (carbono), H (Hidrógeno), O (Oxígeno), N (Nitrógeno) y S (Azufre). Los valores obtenidos se establecen en % en peso. Para la determinación de estos elementos se contó con un analizador elemental FISION EA1108, que se encuentra en el Departamento de Madera, Celulosa y Papel.

### **3.5.1. Determinación de la densidad**

Se realizó por el método del picnómetro expresando esta variable en  $\text{kg m}^{-3}$ . Como en México aún no cuenta con este tipo de determinaciones en los combustibles forestales, no fue posible realizar comparaciones con respecto a especies vegetales. Estas determinaciones nos proporcionan una información clara que concluye que a mayor densidad, mayor es la resistencia a la combustión. Así las maderas con mayor densidad:

- Brindan en los incendios temperaturas más bajas.
- Generan complicaciones a la hora de extinguir los incendios.
- En el inicio del incendio proporcionan buena resistencia a la ignición.

### **3.5.2. Importancia de la determinación de la humedad en una especie forestal**

Esta es una variable de suma importancia para el cálculo del poder calorífico e inflamabilidad. A mayor porcentaje de humedad menor será su PCI y mayor la resistencia de la especie a oponerse al incendio, por lo que su inflamabilidad va ser menor (Proupín, 1998).

El campo de la fisiología de plantas en el área de la agronomía suele estimarse el grado de humedad de la vegetación mediante algunos parámetros que determinan el contenido de agua en los órganos vegetales. Siendo algunos el contenido relativo de agua (RWC) o el potencial hídrico, en el que se expresa el estado energético (Boyer, 1995). Otras determinaciones se basan en la apertura de estomas que indican de una manera indirecta el contenido de humedad de la planta, es decir cuando más cerrado se encuentre el estoma mayor será el estrés hídrico. En cambio en el área de los incendios forestales el estado hídrico de la vegetación viva o muerta se estima a partir del contenido de humedad del follaje (expresado en su porcentaje de peso seco), mientras para los combustibles finos puede aplicarse una medida teórica Equilibrium Moisture Content (Simard, 1968). Por lo que en el área de los incendios forestales el índice más empleado es el contenido de humedad del combustible (Fuel Moisture Content, FMC) (Chuvienco, 2004).

Este FMC, y ya comentado anteriormente, se define como la proporción del peso fresco sobre el peso seco de la muestra y el valor se expresa en porcentaje del peso fresco en vez del peso seco, siendo este último el más común (Chuvienco, 2004).

Para esta investigación el material colectado se depositó en bolsa hermética con la finalidad de evitar pérdida de humedad y posteriormente en laboratorio se cortaba para poder depositar el material combustible por duplicado con un peso no mayor de 5 g en cajas petri. Éstas eran pesadas y colocadas en estufa de secado y cada hora se retiraban las cajas de petri de la estufa y se colocan en un desecador con la finalidad de que el calor presente en la caja no afectará el peso. Al presentar la caja un peso constante con la anterior determinación, esta era calculada definitivamente.

### **3.6. Determinación de parámetros biológicos**

Establecidos los parámetros termoquímicos a desarrollar (poder calorífico, inflamabilidad y composición química), se consideraron los parámetros biológicos que influyen en los incendios forestales. Estos parámetros a determinar se encuentran relacionados con los termoquímicos e íntimamente relacionados con los climáticos, topográficos y los físico ambientales. La combinación de todos estos parámetros se encuentran muy propiamente para cada especie vegetal. A continuación se describe la determinación de cada una de las variables a considerar.

### 3.6.1. Carga calorífica

Se define como la cantidad de combustible de libre “disponibilidad” y presente en la zona. Esto hace que los bosques muy densos tengan una mayor carga calorífica reduciendo así la posibilidad de que se produzca un incendio debido principalmente a la ausencia de vientos y menor oxigenación de la zona (Proupín, 1998). También se debe entender que la cantidad de combustible también influye en la forma, distribución, continuidad y compacidad del material y el tamaño de vegetación alrededor.

Para esta investigación se han seleccionado sitios de monitoreo de 500 m<sup>2</sup> con 246 árboles/ha para categorías diamétricas mayores de 10 dap (diámetro a la altura del pecho) y 20 árboles/ha para menores de 10 cm de dap (Villavicencio, 1992; Rodríguez, 2004). El estudio se estableció tanto para bosque natural como plantaciones desde 14 a 55 árboles/500 m<sup>2</sup> y desde 280 a 1.100 árboles/500 m<sup>2</sup> respectivamente.

### 3.6.2. Evaporación potencial (ETP)

Esta variable se especificará en el apartado correspondiente a los factores bioclimáticos.

### 3.6.3. Composición química de la madera

Se hace especial énfasis a la presencia o no de resinas y compuestos volátiles, los cuáles crean una atmósfera inflamable alrededor del individuo. Así mismo los aceites esenciales presentan un PCS de 3.200 kJ kg<sup>-1</sup> y que llegan a tener una presencia en la composición total del árbol del 15 %. También se busca la presencia o no de los aceites altamente inflamables entre los que destacan las colofonias de los pinos y el cineol de los eucaliptos, por ser estas especies las que más carga de estos compuestos presentan en los bosque gallegos, y en los cuales también se tratará de implementar el estudio. La relación entre estos grupos vegetales se muestra en la siguiente Tabla (Casal et al., 1984; Proupín, 1998). Cabe mencionar que Díaz en 2008 realizó un trabajo sobre la determinación de aceites esenciales para dos especies de pino en el área de estudio.

Compuestos	<i>Pinus radiata</i> D.	<i>Quercus robur</i> L.
Aceites esenciales	3,30%	3,72%
Resinas	8,46%	3,44%

Relación de compuestos entre especies vegetales.

Para determinar los extractos se empleó el procedimientos bajo la norma TAPPI T 204 cm-97 (Solvent Extractives of Wood and Pulp). Este método describe los procedimientos para la determinación de extractos mediante solventes solubles, material no volátil en madera y pulpa. El procedimiento realizado es el siguiente:

1. Colecta del material vegetal.
2. Secado del material a condiciones ambientales (Figura 22 A), para no favorecer la pérdida de compuestos volátiles.
3. Moler el material en un molino Retsch GmbH 5657 type SKI west Germany (Figura 22 B y C).
4. Se pesa por duplicado para cada especie entre 4 y 5 g, y se determina la humedad (Figura 22 D).
5. Se prepara el aparato de extracción Soxhlet con sus respectivos cartuchos de papel preextractados o de vidrio, donde se coloca la muestra (Figuras 22 E y F).
6. En matraces de extracción con capacidad de 250 ml se coloca el solvente Acetona Q. P. con un volumen de 150 a 200 ml de acetona (Figura 22 G).
7. Se colocan los matraces sobre los calentadores eléctricos de 300 W, con su respectivo controlador de calor. El tiempo de extracción es de 6 a 8 horas (Figura 22 H).
8. Obtenido el extracto se quita del Soxhlet y el matraz se coloca en una estufa para secar a peso constante (Figura 22).
9. Se realizan los cálculos correspondientes.



A. Secado del material vegetal



B. Colocación de muestra



C. Molido de la muestra



D. Muestra pesada y colocada en desecador



E. Muestra en aparato de extracción Soxhlet



F. Muestra en proceso de extracción



G. Matraz con acetona



H. Proceso de extracción de 6 a 8 horas

Figura 22. Detalles del proceso completo de obtención de extractos.

Para este caso se determinó la cantidad de extracto en la que podemos encontrar varios tipos como son compuestos inorgánicos, terpenos y ácidos resínicos, monómeros y oligómeros, compuestos nitrogenados, compuestos aromáticos, taninos, etc. Por lo que para determinar la mezcla de estos compuestos es necesario realizar procedimientos más específicos para su separación de cada uno de los grupos.

### 3.7. Variables a determinar o considerar durante el trabajo de campo

La **edad del árbol** es de gran importancia porque se debe determinar para cada especie. A medida que va envejeciendo el árbol, la parte de celulosa que constituye el 60 % en etapa de juventud y con un PCI de  $17.500 \text{ kJ kg}^{-1}$  va siendo sustituida por lignina en el que corresponde para un árbol adulto el 40 % del total y con PCI de  $25.500 \text{ kJ kg}^{-1}$  lo que genera que su PCI incremente de acuerdo a la edad (Proupín, 1998). Para el caso del *Pinus oocarpa* Schiede ex Schlechtendal para determinar la edad el árbol se utilizó la calidad de estación o sitio realizado para esta especie y localidad (Rodríguez, 1998), tal y como se representa en la Tabla 11. Para otras especies se realizó un cálculo de acuerdo a su diámetro y altura, así como de las especies correspondientes a las plantaciones evaluadas.

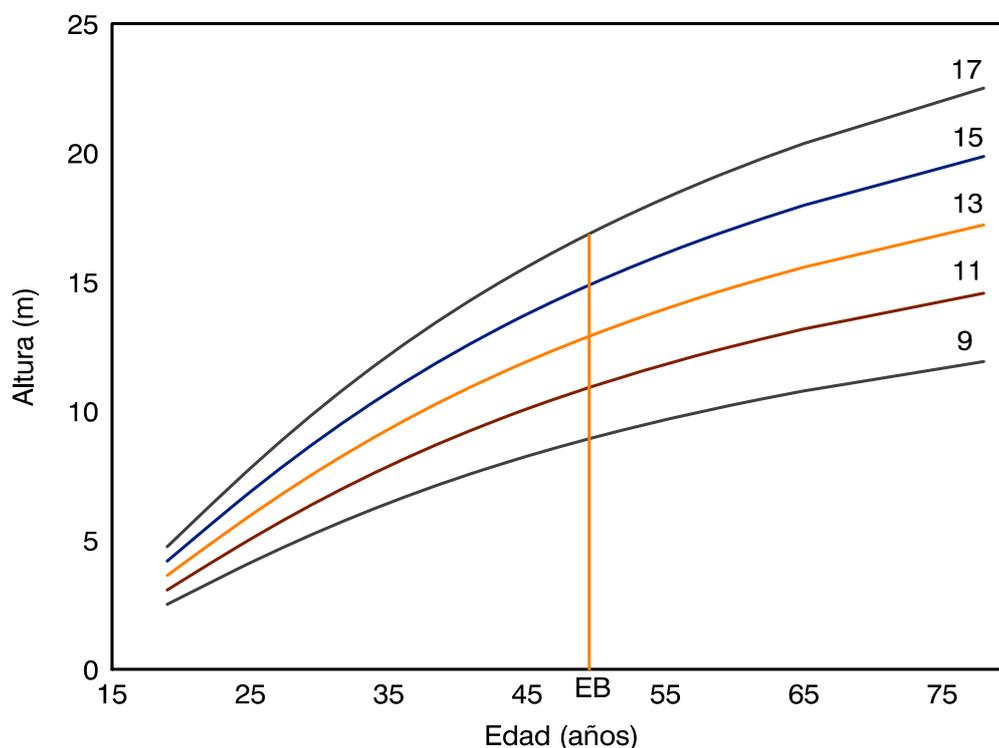


Tabla 11. Calidad de estación o de sitio para *Pinus oocarpa* Sierra de la Primavera (Jalisco, México).

**Contorno y porte de la especie**, de gran importancia a la hora de valorar la propagación del incendio. Dentro del inventario forestal se ha determinado para 100 sitios de monitoreo en el Bosque Escuela que las alturas promedio es de 9,90 m, y con un dap promedio de 210 cm. El 31 % de los 2.463 árboles evaluados presentan un contorno o forma recta vertical con uno o dos fustes (Villavicencio, 1992).

**Residuos forestales** que se generan a través del tiempo son de gran importancia por su elevado poder calorífico cercano  $20.000 \text{ kJ kg}^{-1}$ , alta inflamabilidad de 4 a 5 con una escasa humedad inferior al 20 %. Lo que favorece grandemente en la propagación de los incendios forestales.

**Cubierta forestal en sus alrededores**. La cubierta forestal en cierta área es de vital importancia ya que este material combustible es el responsable de la propagación de los incendios forestales. Por lo que en cada área donde se colecto material se observó si existía combustible y que superficie cubrían.

La comparación entre **especies caducifolias** y **perenes** son de consideración debido a la generación de combustibles forestales ya que las especies pertenecientes a la familia Fagaceae a los que pertenecen los *Quercus* en el mes de Febrero a Marzo caducan lo que provoca la generación de grandes cantidades de combustibles. Por otra parte la ausencia de hojas y la presencia de ganado en el bosque favorecen en el establecimiento de especies de vegetación secundaria.

**Fenología de especies forestales** es un producto del crecimiento y del tipo de la estructura que la conformará. Por lo que la cantidad de las partes vivas de un individuo vegetal se conforma por hojas, brotes, frutos verdes, flores y que están se encuentran constituidos de agua, lo que puede afectar el poder calorífico como también en la inflamabilidad reduciendo en forma considerable la reducción del índice de riesgo a incendio forestal. Para este caso se realizaron observaciones periódicas cada quince días a partir de Enero del 2003. Estas observaciones periódicas en la Sierra de la Primavera se observaron en cada una de las principales especies el estado fenológico que guardaba en el momento de la observación.

### **3.8. Determinación de parámetros climáticos y tiempo atmosférico**

En esta fase se determinan las variables físicas como resultado de la actuación simultánea de la radiación solar, fenómenos atmosféricos, forma y movimiento de la tierra. Siendo las de mayor importancia las siguientes:

1. Humedad del ambiente. Cuando se presenta escasa humedad se generan vientos muy secos, lo que absorbe fácilmente el vapor de agua que es desprendido por las plantas que puede favorecer a la aparición y propagación de incendios forestales.
2. Cuando la temperatura es alta se favorece la transpiración tanto en la planta como el suelo, proceso conocido como evapotranspiración o ETP. La temperatura del suelo depende en gran medida la cobertura vegetal y del aire que incide en la probabilidad de incendio a través de la humedad relativa que determina la humedad del combustible, para este caso conocido como biomasa forestal (Proupín, 1998). Como ejemplos de referencia en bosques de pino en EE.UU. con área basal de 40 m<sup>2</sup>/ha se presentan una transpiración de 500 mm/año y en plantaciones de *Populus tremula* con área basal de 25 m<sup>2</sup>/ha la transpiración se encuentra entre los 70 y 160 mm/ha (Arnaldos *et al.*, 2004).
3. El viento es un fluido continuo que cambia de velocidad según la superficie y orografía que atraviesa (Arnaldos *et al.*, 2004) siendo este fenómeno que influye en el desarrollo y propagación de los incendios forestales y controlan la dirección y velocidad de los mismos. Éstos parámetros antes mencionados generan una aceleración del frente en la que provocan desecación del combustible, aporta oxígeno a la combustión en el incendio, provocan el moviendo de masas calientes de aire, disipación de pequeñas partículas e ignición en áreas adelante del frente. Cuando los vientos se presentan en forma de rachas, no es posible establecer criterios de la velocidad de propagación del incendio, así como de la dirección, lo que dificulta las labores de combate y extinción.
4. Factores como la evapotranspiración (ETP), son los responsables de recargar de humedad el viento provocando variaciones en la humedad relativa en ese momento. De la relación de estos dos parámetros originan que los vientos puedan presentar varios tipos como lo son saturados, relativamente húmedos e insaturados, por lo que el contenido de humedad de los vientos son determinantes en la propagación de los incendios.
5. Nubosidad, es de importancia en la estación de Verano. En un día soleado las plantas herbáceas con la cantidad de agua con que han empezado la jornada puede perderse entre un 20 al 30 % (Arnaldos, *et al.*, 2004).
6. Las tormentas junto a la radiación solar son los factores capaces de provocar los incendios forestales de forma natural, tal como sucede principalmente en Canadá.

Dentro del clima los parámetros que describen el tiempo (temperatura, humedad, viento, precipitación, etc.) pueden presentar confusión entre el tiempo atmosférico o el estado de la atmósfera en tiempo y lugar determinado. Por lo que para esta investigación tomaremos en cuenta la conjunción de ambos términos y así se considerarán las condiciones atmosféricas que se establecen a lo largo del tiempo. La definición de clima se estableció desde 1935 y que son todas las condiciones meteorológicas medias para el mes y el año calculadas sobre periodos de treinta años. En el Bosque La Primavera, a pesar de que se cuenta con meteorólogos de la región, no han establecido aún un análisis de este tipo y mucho menos de diagramas bioclimáticos. La Sierra de la Primavera cuenta con una red de 3 estaciones meteorológicas automáticas marca Davis.

Del único trabajo realizado por Díaz en 2004 estableció algunos análisis de las tres estaciones que se mencionan a continuación:

1. Estación la primavera con ubicación geográfica de 13 Q 655039 UTM 2284090 con registro mayor a ocho años, con discretización inicial de 1 minuto.
2. La estación Residencia ubicada en 13 Q 660750 UTM 2288217 con registros alrededor de cuatro años, con discretización de 15 minutos.
3. Estación San Isidro Mazatepec con localización geográfica de 13 Q 644669 y UTM 2269745, con registros de un poco más de seis años, con discretización de 15 minutos.

De acuerdo al trabajo elaborado por Díaz en 2004 menciona que debido a las dimensiones del área de estudio no encontró variaciones climáticas significativas de muy bajas frecuencias (un ejemplo, mayores de 8 años) en las marchas de las magnitudes meteorológicas entre las estaciones (Díaz, 2004). Por lo que se determinó trabajar principalmente con información generada de la estación 3 (San Isidro), ya que de esta estación con una dirección al norte se encuentra el Campo Experimental Bosque Escuela.

A partir del 2006 se cuenta con otra nueva estación, y ahora todas las estaciones se encuentran con una discretización de 15 minutos.

Díaz en 2004 obtuvo como resultado del registro de series de tiempo de las estaciones climáticas analizadas de manera estadística mostraron que la Sierra de la Primavera presenta rangos promedios de temperatura de 18,6 °C, con una amplitud cuadrática de 5,9 °C, en cambio para la zona urbana se presenta promedio de la temperatura con 20,8 °C y una amplitud cuadrática de 5,3 °C, por lo que es una zona más caliente pero su variabilidad es menor, aunque la zona conjunta entre las dos áreas presenta un comportamiento correlacionado durante todo el año. De la misma forma se presenta el análisis para la precipitación, con diferencia en la cantidad de lluvia y presentando mayor para la zona urbana. El análisis de la correlación espacial cruzada entre la zona urbana y la Sierra de la Primavera muestra valores muy altos de correlación aunque a una distancia corta. Esto nos indica que es una relación muy compleja debido quizá a fenómenos de baja frecuencia y a la configuración topográfica del área, por lo que a futuros trabajos se requerirán una serie de datos con series más largas y una planeación más efectiva de la instalación de sensores.

Con respecto al análisis espectral de las series de temperatura y precipitación climática arroja información clara sobre los ciclos anuales, semianuales y diversos armónicos secundarios menores y muestra un ciclo de aproximadamente cinco años, referente a procesos sinópticos, aunque de menor magnitud que los primeros.

La orografía de la zona es otro rasgo que afecta la relación de la zona, pues se determinaron los parteaguas de la cuenca del río Salado, afluente del río Ameca, y de la cuenca endorreica de la laguna de Sayula-San Marcos, y que funcionan como una barrera natural de las características climáticas de La primavera con dirección a la zona urbana. Por lo que es de esperar que las condiciones climáticas se extiendan mayormente hacia el poniente del área natural, lo cual se puede suponer al estudiar la zona de contacto entre el área natural y la urbana, que se presentan similitud de condiciones del área de contacto que corresponden al norte y sur de ambas áreas, siendo poco distintas a las del resto del bosque que se extienden del centro del mismo hacia el poniente. Sin embargo, el análisis espectral por el método de Gonella mostró que el componente mayor de la elipse generada es de entre 85 y 95° de azimut, apuntando desde la zona de La primavera hacia la ciudad de Guadalajara, además de que la diferencia de altitudes es también determinante. En resumen, se tienen condiciones adecuadas para el funcionamiento de una circulación meteorológica y climática bosque-ciudad, las cuales deberán ser ampliadas por medio de proyectos específicos de investigación (Díaz, 2004).

### **3.9. Parámetros relacionados con el ambiente físico**

Estos parámetros que se consideraron se encuentran aspectos físicos del terreno, y entre los que podemos mencionar:

1. Las zonas dependientes del terreno proporcionan al incendio forestal facilidad para el avance ladera arriba, como consecuencia de la tenencia que tienen las masas del aire caliente a ascender. A demás a mayor pendiente mayor velocidad de propagación (Arnaldos *et al.*, 2004), por lo que para esta investigación se utilizó cartografía digital 1:50.000 como se puede observar en la Figura 23, y en donde podemos observar la complicada topografía del terreno.
2. La zona de solana es la parte que recibe mayor cantidad de radiación solar, que corresponde para las áreas expuestas al sur y oeste, que se encuentran sobre ladera o vertientes que corresponde a una cordillera o zona montañosa.
3. El tipo de suelo proporciona una relación con respecto a la humedad en lo que corresponde a la infiltración del suelo y la retención del mismo, transpiración, etc.
4. Los microclimas que se establecen de acuerdo a condiciones muy específicas de cierta localidad en una zona topográfica. Un claro de este es el efecto Foehn que se presenta en zona de montaña cercana al mar.

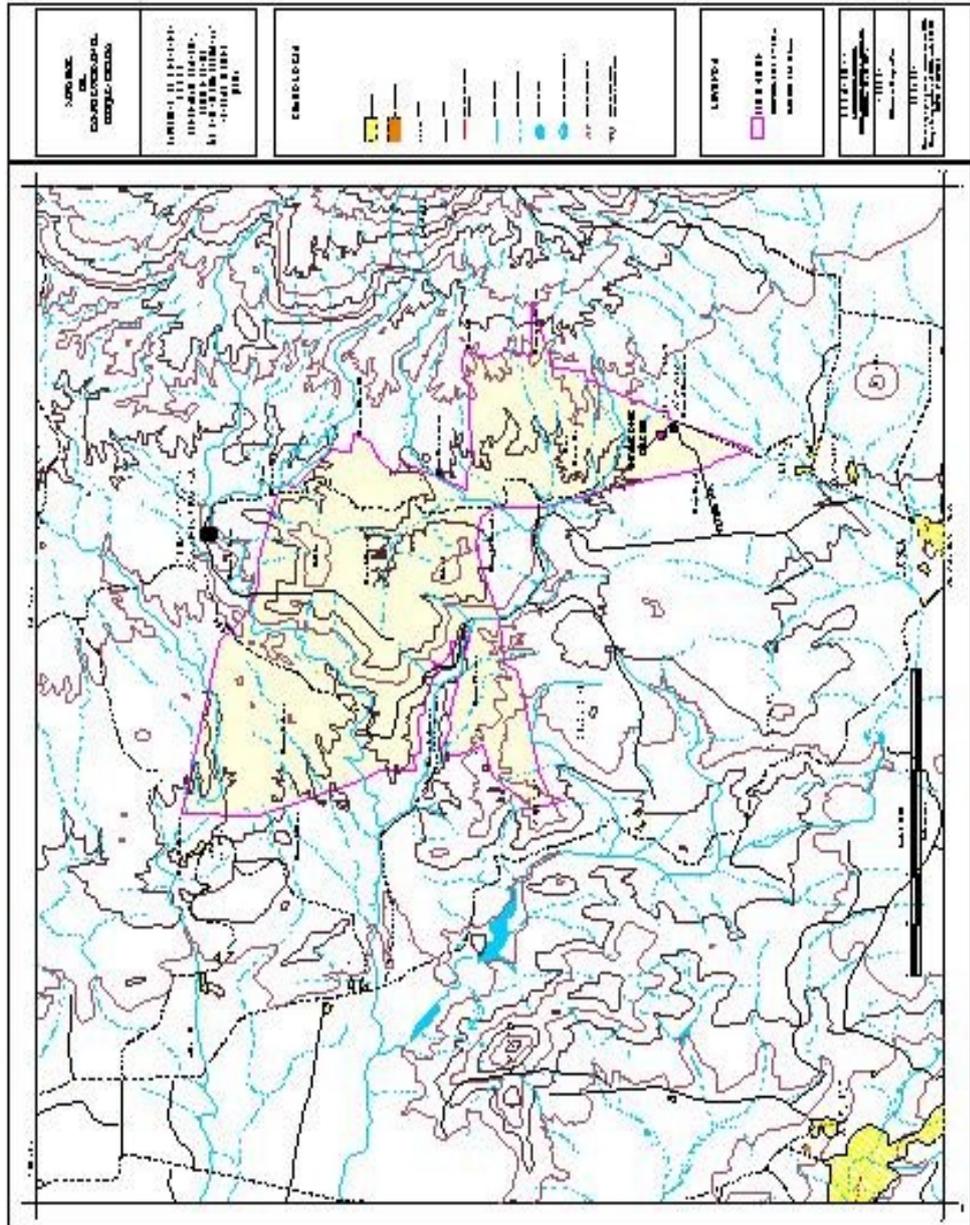


Figura 23. Mapa de cartografía del Bosque Escuela.

### 3.10.1. Recopilación de información vectorial y raster

La imagen que fue posible adquirir es un mosaico de alta resolución espacial del satélite QuickBird obtenida el 9 de junio del 2002 y que fue proporcionada por la Comisión Nacional Forestal (Gerencia de Inventarios Forestales y Geomática).

Se contó además con un Modelo Digital de Elevación (MDE) resolución 1:28,5 m, Vectoriales de redes de caminos del INEGI, perímetro vectorial del área de estudio. Los programas empleados en el procesamiento Erdas 8.7, Er Mapper 6.4 y arc View 3.3

### 3.10.2. Corrección geométrica

Este procedimiento se realizó para tratar de proporcionar en la imagen cambios en las posiciones que ocupan los píxeles que lo forman. La posición es con respecto a sus coordenadas (Chuvienco, 2002). Para el caso el mosaico QuickBird que fue corregido geoméricamente se utilizó información topográfica vectorial de la red de caminos y el MDE, los cuales fueron trabajados con una proyección UTM esferoide WGS84. Para esta corrección se emplearon 10 puntos de control que se encontraron bien identificados. Estos puntos son comunes a la imagen y a la red vectorial. Cabe mencionar que este proceso no tuvo los resultados esperados por la razón de la diferencia entre escalas entre imagen y la red vectorial de caminos.

### 3.10.3. Calibrado de la imagen

El proceso implica una técnica en el que se modifican los valores del ND (Nivel o Número Digital) originales, ya que estos problemas radiométricos son derivados por el mal funcionamiento del sensor, junto a la obtención de magnitudes físicas y correcciones atmosféricas en los datos (Chuvienco, 2002).

Para el caso de las imágenes QuickBird existen procedimientos específicos para este tratamiento tal como se menciona en las notas técnicas de Digital Globe (2003).

La conversión de la radiancia espectral de la parte superior de la atmósfera es un proceso que involucra dos etapas, por lo que se requiere multiplicar el píxel de la imagen corregida radiométricamente (también referente al factor K) que obtiene la banda de radiancia integrada [ $W m^{-2} sr^{-1}$ ], posteriormente se divide el resultado por la el efectivo ancho de banda para obtener la radiancia espectral [ $W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$ ]. Basado todo sobre mediciones reales en el terreno y confirmado por el análisis de Joint.

Tanto los datos proporcionados por la Agency Comercial Imagery Evaluation (JACIE) como por el Equipo QuickBird absoluto del factor de calibración radiométrica fueron revisados. Las revisiones se basan sobre estimaciones pre vuelo y podrían ser aplicadas a toda las imágenes QuickBird adquiridos del lanzamiento de la presente fecha.

El factor absoluto de calibración radiométrico (Factor K) que cada producto de QuickBird se contienen en los archivo metadatos de la imagen (IMD). Con estos valores se emplean para convertir la radiancia integrada de la banda o radiancia espectral. Sin embargo los productos generados antes del 6 de Junio 2003 han estado distribuidos con el factor original de calibración. Para mejores resultados de la radiancia integrada de banda o radiancia espectral podrían ser transformados usando los factores listados de las notas técnicas. Estos se encuentran en los archivos .IMD.

La conversión de la radiancia integrada de banda empleando el factor absoluto de calibración y el factor de conversión K', de acuerdo al seguimiento de la ecuación.

### 3.10.4. Banda integrada de radiancia [ $W m^{-2} sr^{-1}$ ]

El camino para convertir los productos QuickBird de valores de píxel de la imagen corregida a banda integrada de radiancia depende del tiempo generado y depende del producto. Estos valores se encuentran contenidos en los .IMD según la siguiente expresión:

$$L_{\text{pixel, Banda}} = \text{absCalFactor}_{\text{Banda}} \cdot K'_{\text{Banda}} \cdot q_{\text{pixel, Banda}} / \Delta\lambda$$

Donde  $L_{\text{pixel, Banda}}$  es el píxel de la imagen de la banda integrada de radiancia en la parte superior de la atmósfera [ $W m^{-2} sr^{-1}$ ],  $\text{absCalFactor}_{\text{Banda}}$ , es el factor original absoluto radiométrico [ $W m^{-2} sr^{-1} \text{count}^{-1}$ ] dado en la banda y en la lista de los archivos .IMD,  $K'_{\text{Banda}}$  es un factor de conversión del factor original absoluto de calibración que se encuentran para cada banda, y  $q_{\text{pixel, Banda}}$  son los píxeles corregidos radiométricamente [mostrados].

### 3.10.5. Promedio de banda de radiancia espectral [ $W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$ ]

El segundo paso es la conversión de la radiancia espectral de parte superior de la atmósfera y esta es dividida por la radiancia de la banda integrada ( $\Delta\lambda$ ). Efectivamente el ancho de bandas fueron calculadas desde el QuickBird en respuesta a curvas de la radiancia espectral relativa de cada banda y se muestran a continuación.

Factor de conversión K' para 8 bit			
Banda espectral	Nivel TDI	K'	Ancho de banda Efectivas K'
Blue	NA	1,12097834	0,068
Green	NA	1,37652632	0,099
Red	NA	1,30924587	0,071
NIR	NA	0,98368622	0,114

La conversión se aplicó para cada una de las bandas del mosaico, las cuáles servirán posteriormente para realizar la corrección de la radiancia por el efecto topográfico.

### 3.10.6. Corrección del sombreado topográfico

Otro cálculo a considerar en la reflectividad o el efecto del relieve. Por este motivo la reflectividad es muy dependiente de los ángulos de incidencia y observación. Este procedimiento trata de compensar la reflectividad del terreno, de acuerdo al relieve que se presente es fundamental para zonas con fuertes relieves. Para el caso de las imágenes de satélite este efecto topográfico es constante en cada banda o es similar al efecto atmosférico que es independiente de la longitud de onda  $\lambda$ .

Uno de los procedimientos para eliminar este efecto es aplicar un cociente entre las bandas de la misma imagen. Otra forma es contar con un preciso MDE y bien ajustado a la imagen con el que se puede estimar la variación en los ND.

Para este caso se contó con un MDE y se calculó el ángulo de incidencia de la vertiente ( $\gamma_i$ ), la cuál depende de los ángulos solares y de la pendiente como propone (Civco, 1989; Chuvieco, 2002). El cálculo se realizó a través de la siguiente expresión:

$$\cos \gamma_i = \cos \theta_i \cos \theta_p + \sin \theta_i \sin \theta_p \cos (\varphi_a - \varphi_o)$$

Donde  $\gamma_i$  corresponde al ángulo cenital del flujo incidente,  $\theta_i$  indica el ángulo cenital solar,  $\theta_p$  el gradiente de la pendiente, y  $\varphi_a$  ángulo acimutal solar y  $\varphi_o$  el ángulo de la orientación de la pendiente. Los cuáles se pueden obtener del MDE y de la fecha y hora de adquisición del satélite. Se determinó que el ángulo de elevación solar es de 64,6978 grados y el acimutal solar de 81,2798 grados. Por este procedimiento se obtuvo la imagen de iluminación la Figura 23 A.

El cálculo del ángulo de incidencia puede determinarse por varios métodos para la radiación incidente entre vertientes. Para este caso se ponderó la imagen de iluminación en función de las condiciones promedio de iluminación de la imagen, por lo que se aplico la siguiente ecuación (Civco, 1989, Chuvieco, 2002):

$$P_{h,i} = P_i + P_i (\cos \gamma_m - \cos \gamma_i) / (\cos \gamma_m)$$

Donde el subíndice  $_m$  indicaría el valor promedio de la iluminación de la imagen.

Con este procedimiento se reduce el efecto topográfico, aunque no todo lo que debiera. Todas estas correcciones como las anteriores es constante para todas las bandas. De este procedimiento se obtuvo la Figura 24 B. Como se puede observar comparando las Figuras (24 B y 24 C) podemos observar que se presentan varias zonas donde la iluminación aumento considerablemente con respecto a la Figura 24 A, entre algunas zonas como se muestra en las flechas.

Este procedimiento se realiza para comprobar si efectivamente el valor obtenido al píxel, se presentan variaciones en los píxeles antes y después del procedimiento. Lo que favorece en homogenizar áreas por diferentes condiciones como son pendiente, zonas topográficas más accidentadas y exposición del terreno.

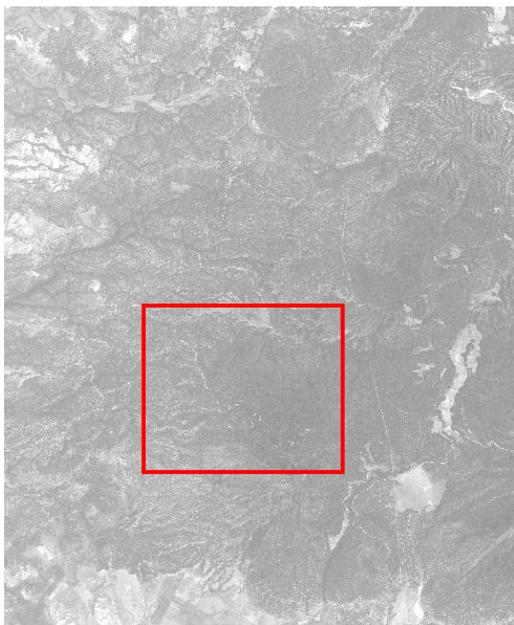


Figura 24 A. Imagen QuickBird original.



Figura 24 B. Imagen de iluminación.

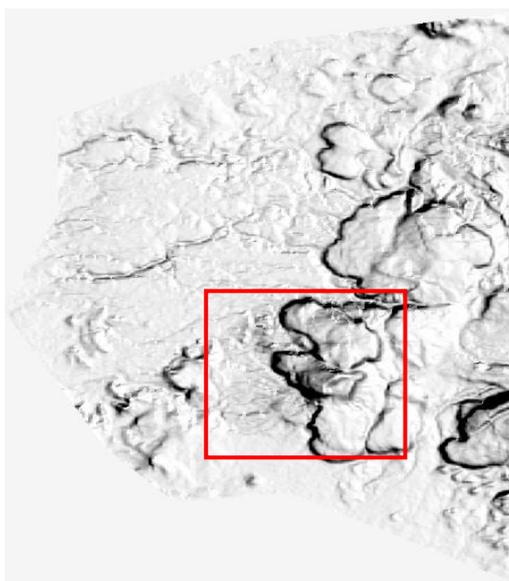


Figura 24 C. Imagen corregida iluminación.

### 3.10.7. Selección de áreas de entrenamiento y clasificación supervisada

Para este proceso se seleccionaron 88 regiones distribuidas en todo el mosaico de la imagen, los cuáles son polígonos en los diferentes tipos de vegetación, y en el que se consideraron todas las coberturas del suelo. Posteriormente a estas regiones se ubicaron 208 puntos. Estos puntos se encontraban en la parte central de cada una de las regiones y tratando de no tener efecto de borde, posteriormente estas se emplearon como áreas de entrenamiento. Las áreas que fueron seleccionadas pertenecen a las siguientes categorías: para suelo descubierto presentaron 46 sitios para pino, para pasto verde o cultivo con 31, cultivos con 26, encinos 31 sitios, caña con 41 y áreas quemadas con 33 sitios. Cabe mencionar que la clasificación para la vegetación subtropical en el que encontramos el género *Acacia* se tuvo que eliminar debido a que al momento de realizar la clasificación, estas especies forestales se encontraban de una forma aislada y en varias zonas que se presentaban existía superficie de suelo quemado, éstas áreas principalmente de cultivos y es posible que la quema de esquilmos agrícolas ocasiono que el fuego afectará a otras zonas de la región.

### **3.10.8. Procesamiento de imagen de satélite Aster**

Se realizaron las correcciones correspondientes en la imagen de satélite como la corrección geométrica y topográfica, ya que con ella se realizó una clasificación no supervisada y supervisada. El mejor resultado fue la no supervisada, ya que existe mucha confusión en el análisis la separación espectral.

### **3.10.9. Elaboración de mapas temáticos del valor calorífico de las especies forestales**

De los valores caloríficos mensualmente obtenidos de las especies forestales, se promediaron como corresponden para cada estación del año. Para ello fue necesario realizar un análisis factorial para la creación de rangos y poder así establecer clases de valor calorífico.

Los mapas se realizaron por estación a partir del verano del 2003 al otoño del 2005. En estos mapas incluían especies colectadas en cada periodo estacional, ya que hay especies que por su fenología no se reportan para cierta estación. Para ello fue necesario realizar un recorte del mosaico y considerar solamente el área de estudio Bosque Escuela para los mapas.

La última parte de la creación de mapas de riesgo a incendios forestales se realizó mediante la imagen Aster y únicamente para el periodo 2005 con toda la información que se generó ese año ya que ese año se presentó un incendio de gran magnitud.



A decorative graphic consisting of a vertical blue line on the right, a horizontal blue line at the bottom, and a horizontal yellow line above the word 'RESULTADOS'. Two overlapping squares are positioned above the yellow line: a white square with a black border and a yellow square with a yellow border. The number '4' is centered within the yellow square.

4

**RESULTADOS**

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Determinación y evaluación del poder caloríficos mediante análisis estadístico para las especies forestales estudiadas

El análisis estadístico realizado para cada una de las especies vegetales y para cada estación del año tiene como finalidad determinar el poder calorífico superior de las diferentes especies forestales, y con ello poder establecer por especie y estación su valor. Esta diferenciación se realizó mediante un análisis factorial empleando como variable dependiente  $w$  (valor calorimétrico en unidades  $\text{BTU lb}^{-1}$ ) y los factores meses y especie (con su duplicado a los que se definen con  $ra$  y  $rb$ ). Para este caso se analizó M1, *Pinus oocarpa*, que corresponde a bosque natural (bn); M2, *Acacia pennatulata* (bn), M3 *Quercus resinosa* (bn); M4, M5 y M6, *Pinus oocarpa*, *P. douglasiana* y *P. devoniana* respectivamente, siendo todas estas especies de plantaciones (plt). Los meses analizados fueron de Agosto de 2003 a Mayo de 2004 (8, 9, 11, 12, 13, 14, 16 y 17). No fueron considerados los meses Octubre de 2003 (10) y Marzo de 2004 (15).

Del resultado del análisis de la varianza se determinaron diferencias con respecto a los meses ( $p=0,0151 < 0,05$ ) y diferencias en las especies ( $p=0,0000 < 0,05$ ). Por lo que para establecer estas diferencias se comprobaron mediante la prueba de rangos múltiples por el método de Duncan y la gráfica de intervalos de medias LSD y que se puede observar en la Figura 25. En esta Figura se observa que los intervalos muestran el comportamiento del valor calorimétrico en los 8 meses del periodo de Agosto de 2003 a Mayo de 2004, el que se encuentran conformado por tres grupos homogéneos, uno de los cuáles, los meses 8, 9, 11 y 12 (Agosto a Diciembre de 2003) es un mismo grupo con promedio de 7.902,13 a 8.270,70  $\text{BTU lb}^{-1}$ .

El segundo grupo lo conforman los meses de Agosto (8), Septiembre (9), Noviembre (11), Diciembre (12) año 2003; Enero (13), Febrero (14), Abril (16) y Mayo (17) de 2004, en estos meses se encuentran verano, otoño, invierno del 2003, así como primavera 2004, con promedios que van de 8.141,14 a 8.414,99  $\text{BTU lb}^{-1}$ . Como se observa, la diferencia entre los valores es menor ya que abarca varias estaciones del 2003 pudiendo establecer que este año en la región se presentaron lluvias a lo largo del año, por lo que la calorimetría no presentó cambios tan significativos. Para el otro grupo podemos mencionar que ahí se encontraron los meses 8, 12, 13, 14, 16 y 17.

Lo que correspondería a los periodos verano, otoño, invierno (2003) y primavera (2004) con rangos que van de 8.172,82 a 8.576,70  $\text{BTU lb}^{-1}$ .

Cabe mencionar que el mes de Agosto (verano 2003) presentó un promedio alto de los valores calorimétricos 8.270,70  $\text{BTU lb}^{-1}$ ; siendo el mayor de todos el mes de Abril (primavera 2004). La gráfica de intervalos de las medias (LSD) del valor calorimétrico de las especies se muestra en la Figura 25.

Este mismo análisis para las diferentes especies, y la gráfica de intervalos de medias LSD, tal como se observa en la Figura 26 podemos destacar la conformación de 3 grupos, que es conformado el primero ellos con los valores menores para M3 (*Quercus resinosa*) entre 7.500 y los 7.600  $\text{BTU lb}^{-1}$ , el segundo grupo lo conforman M1, M2 y M4 (*Pinus oocarpa* (bn); *Acacia pennatulata*; *P. oocarpa* (plt)) con valores entre los 8.000 y los 8.400  $\text{BTU lb}^{-1}$ . Un último grupo lo conforman *Pinus douglasiana* y *P. devoniana* (M5 y M6) con valores de 8.500 a 8.700  $\text{BTU lb}^{-1}$ .

Así tanto en la gráfica de intervalos de las medias como en la prueba de Duncan para las especies, se destacan cuatro grupos homogéneos, tal y como se muestra en la Tabla 12. Presentando el primer grupo con promedios para *Quercus resinosa* que se encuentran de 7632,69 a 7703,53  $\text{BTU lb}^{-1}$ , siendo estos los más bajos del análisis, dentro de este grupo encontrándose *Pinus oocarpa* (bn) con valor de 8059,15  $\text{BTU lb}^{-1}$ .

Por orden de importancia se encuentra el grupo dos, en el que encontramos *Pinus oocarpa* (bn) con valores de 8267,78 siguiendo el *Pinus oocarpa* (plt) con rangos de 8.299,76 y 8.211,42  $\text{BTU lb}^{-1}$ , esto puede deberse a la procedencia de los pinos, *Acacia pennatulata* es superior a los anteriores con un valores que van de 8.406,90 a 8.339,73  $\text{BTU lb}^{-1}$ . *P. devoniana* (plt) con valor de 8.502,13  $\text{BTU lb}^{-1}$ .

El tercer grupo lo conforman *Pinus oocarpa* de 8.267,78 a 8.211,42  $\text{BTU lb}^{-1}$ , *Acacia pennatulata* con valores entre los 8.339,73 a 8.406,90  $\text{BTU lb}^{-1}$ , *Pinus devoniana* lo encontramos entre los 8.502,13 a 8.678,27  $\text{BTU lb}^{-1}$  y *Pinus douglasiana* con 8.573,10  $\text{BTU lb}^{-1}$ .

El cuarto grupo lo conforman *P. douglasiana* (plt) con valores entre los 8.573,10 a 8.678,10  $\text{BTU lb}^{-1}$ , siendo los de mayor valor. Esta especie es endémica de la zona y como se puede observar en la Tabla 12, la mayoría de los pinos evaluados corresponden a plantaciones solamente una especie de cada familia *Pinaceae*, *Leguminosae* y una *Fagaceae* corresponden a especies de bosque natural.

Grupo 1	Especies	Valores BTU/lb
1	<i>Quercus resinosa</i> r <sub>a</sub> y r <sub>b</sub> <i>Pinus oocarpa</i> (bn) r <sub>b</sub>	7.632,69-7.703,53 8.059,15
2	<i>P. oocarpa</i> (bn) r <sub>a</sub> y r <sub>b</sub> <i>P. oocarpa</i> (plt) r <sub>a</sub> y r <sub>b</sub> <i>Acacia pennatulata</i> r <sub>a</sub> y r <sub>b</sub> <i>P. devoniana</i> (plt) r <sub>b</sub>	8.267,78-8.059,15 8.299,76-8.211,42 8.406,90-8.339,73 8.502,13
3	<i>P. oocarpa</i> (bn) r <sub>a</sub> <i>P. oocarpa</i> (plt) r <sub>a</sub> y r <sub>b</sub> <i>Acacia pennatulata</i> r <sub>a</sub> y r <sub>b</sub> <i>Pinus devoniana</i> (plt) r <sub>a</sub> y r <sub>b</sub> <i>Pinus douglasiana</i> (plt) r <sub>b</sub>	8.267,78 8.299,76-8.211,42 8.406,90-8.339,73 8.678,27-8.502,13 8.573,10
4	<i>P. oocarpa</i> (bn) r <sub>a</sub> <i>P. oocarpa</i> (plt) r <sub>a</sub> <i>Acacia pennatulata</i> r <sub>a</sub> y r <sub>b</sub> <i>Pinus devoniana</i> (plt) r <sub>a</sub> y r <sub>b</sub> <i>Pinus douglasiana</i> (plt) r <sub>a</sub> y r <sub>b</sub>	8.267,78 8.299,76 8.406,90-8.339,73 8.678,27-8.502,13 8.678,27-8.573,10

Tabla 12. Análisis del poder calorífico de las especies forestales mediante la prueba de Duncan.

Otro análisis realizado fue entre el *Pinus devoniana* M21 (bn), *Acacia pennatulata* M22 y el combustible muerto formado por las acículas de *Pinus pseudostrobus* M20s (sustrato) (plt), los cuales fueron evaluados durante los meses de Enero a Mayo de 2004. Del análisis de la varianza no se encontró diferencias significativas entre los meses, ya que el  $P=0,0623$  es mayor que el nivel de confianza dado de 0,05. Sin embargo en las especies si se encontraron diferencias, ya que en este caso el valor de P fue de 0,0244 siendo menor que 0,05 nivel de confianza dado. En la Figura 27 se pueden ver como los promedios calorimétricos varían de 7.900 a 9.200 BTU lb<sup>-1</sup>, no encontrándose diferencias entre ese periodo.

El comportamiento calorimétrico de las especies en los meses evaluados, y que se puede observar en la Gráfica (Figura 28), se puede definir en dos grupos muy definidos. Al realizar la prueba de Duncan se identificaron dos grupos tal como se muestra en la Tabla 13.

Grupo 1	Especies	Promedio (BTU lb <sup>-1</sup> )	Limites (BTU lb <sup>-1</sup> )
1	<i>Acacia pennatulata</i>	7.922,51	7.460,40-8.384,61
2	<i>Acacia pennatulata</i> <i>P. devoniana</i> (bn) <i>P. pseudostrobus</i> (sustrato) (plt)	8.259,76	7.797,65-8.721,86 8.350,36-9.363,24 8.325,02-9.379,29

Tabla 13. Análisis del valor calorimétrico de especies forestales mediante la prueba de Duncan.

La Tabla 13 establece dos grupos homogéneos, el primero de ellos con rangos de 7.460,40 a 8.384.61 BTU lb<sup>-1</sup> y con promedio de 7.922,51 BTU lb<sup>-1</sup>. En esta primera clase se encuentra solamente *Acacia pennatulata*, en el segundo grupo se encuentra esta misma especie y se incluye *P. devoniana* (bn) y *P. pseudostrobus* sustrato de plantación. Ambos presentan los mayores valores de límites superiores entre 7.797,65 y 9.379,29 BTU lb<sup>-1</sup>.

Otro análisis realizado fue entre las especies de *Quercus resinosa* M10, *Clethra rosei* M11 y *Verbesina greenmanii* M14, ya que son especies de importancia forestal en el área de estudio. Todas ellas corresponden a bosque natural. Los meses evaluados fueron Noviembre y Diciembre de 2003, Enero a Mayo de 2004. Aquí de acuerdo a la estación del año se analizaron otoño-invierno (2003) y primavera (2004). El análisis de Anova establece que el valor de P para los meses es de 0,0635 y el valor de P para las especies es 0,9527, de ambos valores de P son mayores que el nivel de confianza dado 0,05, por lo que se establece que no hay diferencias en los promedios calorimétricos tanto en los meses como en las especies. En la Figura 29 se puede observar que los rangos de variación de los promedios en los meses están entre 6.600 y 8.200 BTU lb<sup>-1</sup>. Aunque no hay diferencias en los meses se puede apreciar que el mes de Noviembre de 2003 presenta un promedio de 6.939,02 BTU lb<sup>-1</sup>, que es ligeramente menor que los otros meses, lo que nos motiva hacer futuras investigaciones para analizar más detalladamente este comportamiento.

Aunque como se mencionó no existen diferencias significativas entre las especies evaluadas, es importante conocer los rangos de los valores calorimétricos que presenta cada una de las especies evaluadas. En la Tabla 14 se muestra que las tres especies de *Quercus resinosa* presentan valores entre los 7.490,7 a 7.570,99 BTU lb<sup>-1</sup>.

Especies	Valores (BTU lb <sup>-1</sup> )
<i>Quercus resinosa</i>	7.490,70-7.570,99
<i>Clethra rosei</i>	7.583,51-7.579,13
<i>Verbesina greenmanii</i>	7.427,59-7.385,43

Tabla 14. Resultados de los promedios calorimétricos de especies evaluadas *Quercus resinosa*, *Clethra rosei* y *Verbesina greenmanii*.

El análisis con tres especies que conforman plantaciones forestales en el área de estudio, en las que se determinaron *Pinus halepensis* M 18, *Eucalipto camaldulensis* M19 y *Pinus pseudostrobus* M 20, en el que se evaluaron los meses de Enero a Mayo de 2004 como se muestra en la Figura 30. El menor valor calorimétrico de las especies en los meses evaluados se encuentra en el mes de enero con 8.397,99 BTU lb<sup>-1</sup> y Febrero con 8.607,45 BTU lb<sup>-1</sup> que ambos corresponden estos meses al invierno de 2003. Los meses Marzo a Mayo se encuentra entre los rangos de 8.471,78 a 8.574,44 BTU lb<sup>-1</sup>. Es importante resaltar que para este análisis no se encontraron diferencias estadísticas, ya que el valor de P es de 0,7476 siendo mayor que 0,05.

Para el caso del valor calorimétrico entre estas especies, no se encontraron diferencias significativas, ya que el valor de P=0,1593, es mayor que el nivel de confianza 0,05. Los rangos de variación los podemos observar en la Figura 31. Como se puede observar se presentan dos grupos de comportamiento, el primero de ellos lo conforman el *Pinus halepensis* M18 y *Eucalyptus camaldulensis* M19, el otro grupo lo representa únicamente *Pinus pseudostrobus* M20, comportamiento que es necesario estudiar en futuras investigaciones, además de aclarar que esta especie es exótica por lo que posiblemente que el estrés provoque altas producciones de resina

Podemos establecer que durante los meses evaluados se presentó un valor calorimétrico en las especies entre los 8.397,70 a 8.614,57 BTU lb<sup>-1</sup>. Con respecto a las especies podemos observar que en la Tabla 15 se muestran los intervalos de confianza.

Especies	Valores (BTU lb <sup>-1</sup> )
<i>Eucalyptus camaldulensis</i> ra y rb	8.393,70-8.397,32
<i>Pinus halepensis</i> ra y rb	8.398,44-8.415,13
<i>Pinus pseudostrobus</i> ra y rb	8.824,57-8.614,57

Tabla 15. Resultados de los intervalos de confianza pruebas LSD

Como se muestran en la Tabla 15 y los resultados de la prueba de Duncan, se establecen dos grupos en los que no hay diferencias significativas. El primero entre las dos primeras especies es muy similar (*P. halepensis* y *E. camaldulensis*) y se encuentran entre los valores de 8.393,70 y 8.415,13 BTU lb<sup>-1</sup> y un segundo grupo lo conforma *P. pseudostrobus* que presentan promedios entre los 8.824,57 y 8.814,57 BTU lb<sup>-1</sup>.

Otro material que se involucra en la reignición de los incendios forestales es el estiércol de ganado vacuno M13. Su evaluación es para establecer su poder calorífico correspondiente en los meses Septiembre, Diciembre de 2003, Enero, Febrero, Marzo, Abril y Mayo de 2004. El resultado sobre este análisis nos indica que los valores de P para los meses y el material (estiércol) son 0,0191 y 0,21179 respectivamente. Lo que nos indica que solo se encontró diferencias significativas en los promedios calorimétricos de los meses.

Como se puede observar el comportamiento entre los meses presenta variaciones como se observa en la Figura 32, presentando en el mes de Septiembre de 2003 el más bajo con rangos de 4.312,47 y 5.127,63 BTU lb<sup>-1</sup>, este mes corresponde a la estación de verano, el de mayor valor corresponde al mes de Marzo que representa la estación de primavera con rangos que van de 6.562,00 BTU lb<sup>-1</sup>.

Para el caso de los valores obtenidos de la prueba LSD establece tres grupos, el primero de ellos Septiembre de 2003 que corresponde a verano y que se encuentra entre los rangos de 4.312,47 a 5.127,63 BTU lb<sup>-1</sup>. El segundo grupo lo conforman septiembre y diciembre que es verano y otoño 2003 que se encuentra entre los rangos 5.127,63 y 5.952,83 BTU lb<sup>-1</sup>. En el último grupo se encuentran los meses de Diciembre de 2003 y de Enero a Mayo de 2004 correspondiente a la estación de invierno primavera con rangos de 5.952,83 a 6.562,63 BTU lb<sup>-1</sup>.

Especies	Valores (BTU lb <sup>-1</sup> )
Estiércol de ganado vacuno	5.734,76-5.973,37

Tabla 16. Resultados de los intervalos de confianza pruebas LSD para el estiércol de ganado.

Como se observan los resultados del estiércol de ganado vacuno en la Tabla 16, presenta valores bajos a comparación con los combustibles forestales. Esto es muy interesante en el aspecto de incendios forestales, ya que los troncos de encino, pino y estiércol son los principales responsables de la reignición de los incendios forestales en la zona de la Primavera.

Otro combustible de importancia en la propagación de los incendios forestales es las especies de gramíneas (pastos). Para poder establecer su poder calorífico de *Rhynchelytrum repen* Willd (M7) se analizó los meses de Agosto y Diciembre de 2003 que corresponden a verano y otoño, así como Enero y Febrero de 2004. Con los resultados no se encontró diferencias significativas con respecto con  $P=0,5851$  con respecto a las especies y  $P=0,36655$  con los meses. Se presentó calculado a  $J\ kg^{-1}$  para M7 en estación de verano las más alta con  $16.981,93\ J\ kg^{-1}$  y la mínima de  $10.056,62\ J\ kg^{-1}$ .

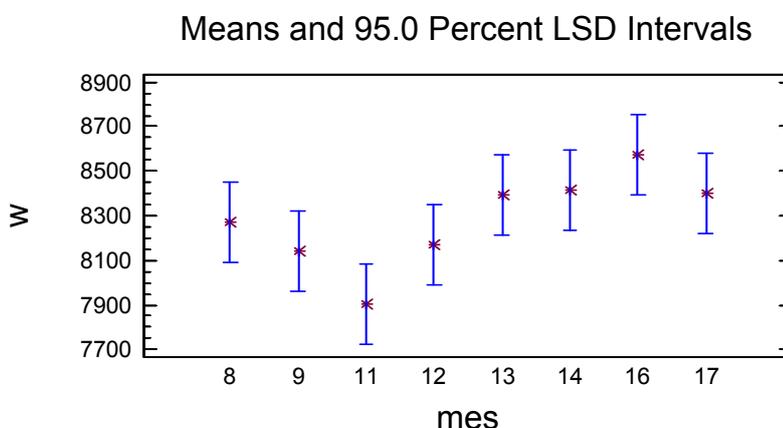


Figura 25. Comportamiento del valor calorimétrico mensual de especies forestales de M1, M2, M3, M4, M5 y M6.

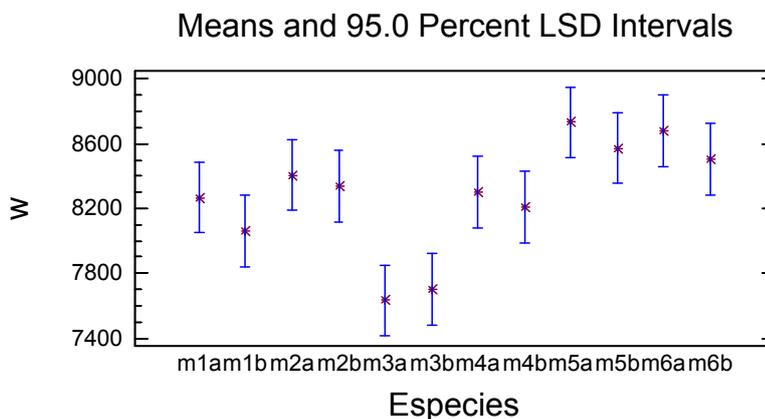


Figura 26. Comportamiento del valor calorimétrico de especies forestales de M1, M2, M3, M4, M5 y M6.

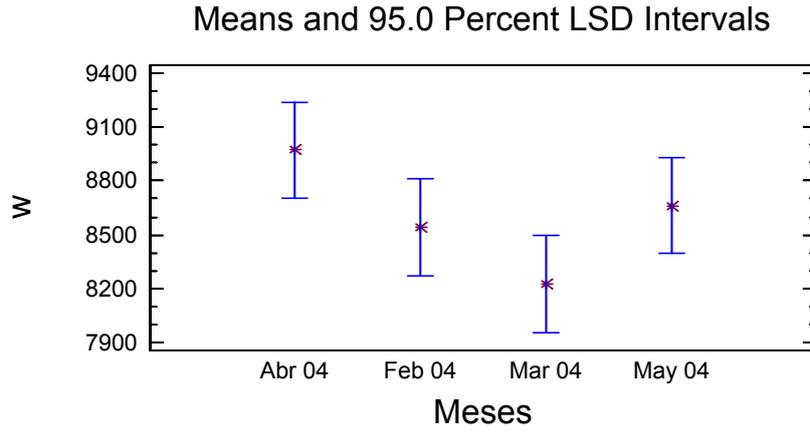


Figura 27. Comportamiento del valor calorimétrico mensual de especies forestales de M20s, M21 y M22.

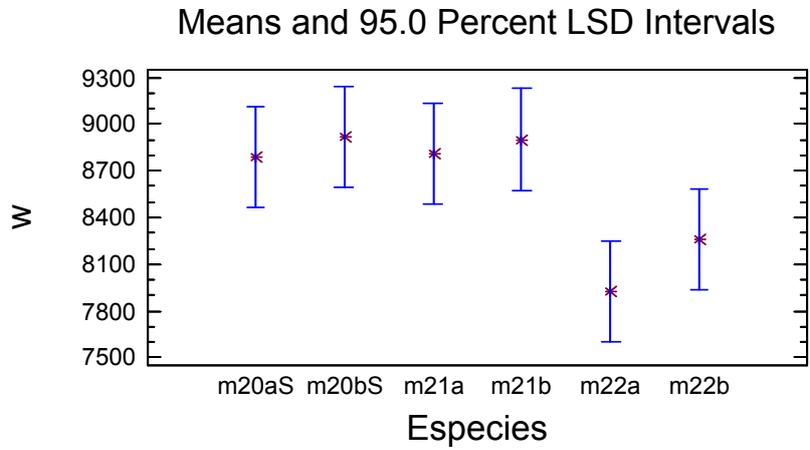


Figura 28. Comportamiento del valor calorimétrico de especies forestales de M20s, M21 y M22.

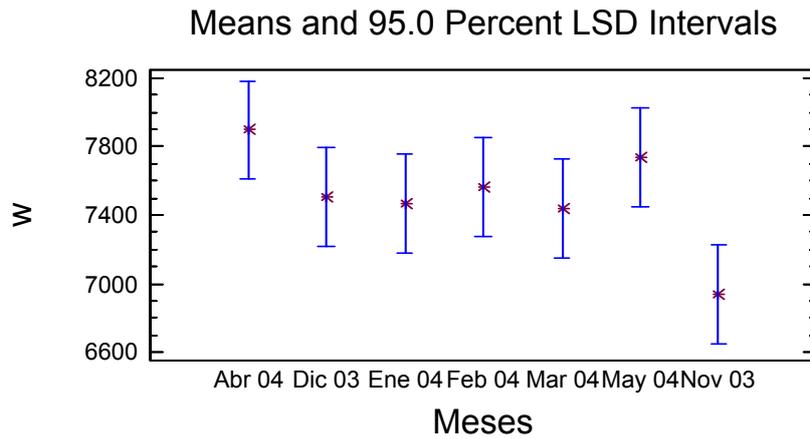


Figura 29. Comportamiento del valor calorimétrico mensual de especies forestales de M10, M11 y M14.

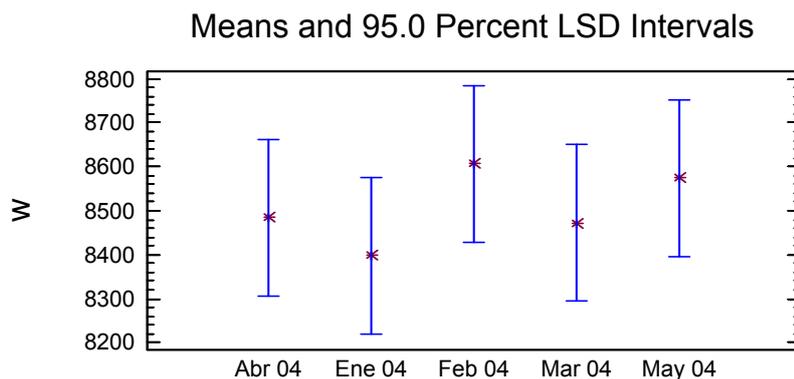


Figura 30. Comportamiento del valor calorimétrico mensual de especies forestales de M18, M19 y M20 en 2004.

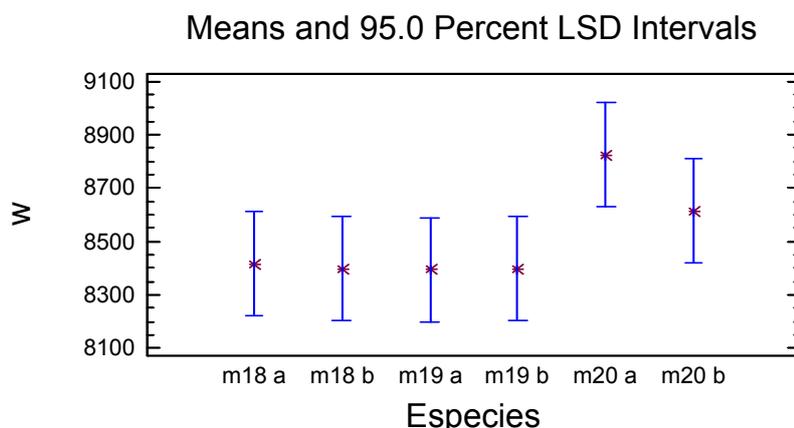


Figura 31. Comportamiento del valor calorimétrico de especies forestales de M18, M19 y M20 en 2004.

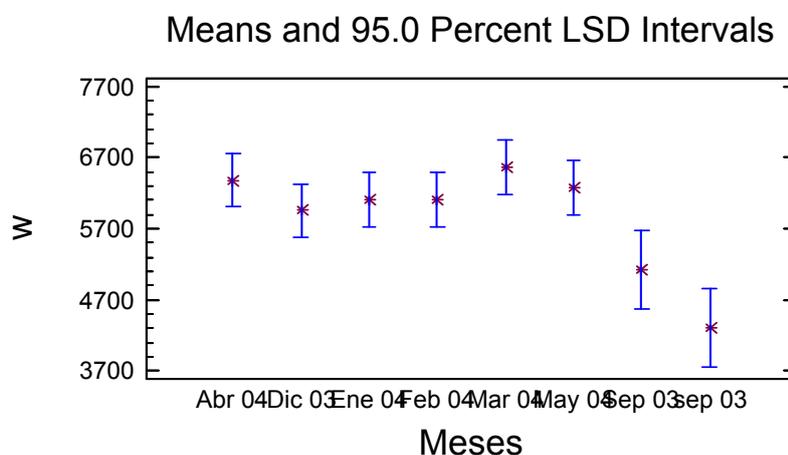


Figura 32. Comportamiento del valor calorimétrico mensual combustible M13.

#### 4.2. Resultados de las experiencias del cálculo de los poderes caloríficos

La Tabla 17 muestra los poderes caloríficos promedio ( $\text{kJ kg}^{-1}$ ) de 13 especies forestales obtenidas mediante experiencias calorimétricas. De estos valores dos corresponden a sustratos o combustibles ligeros "secos" de *Pinus*. Esta evaluación se realizó para las 4 estaciones de 2005.

Como se mencionó anteriormente, para el año 2005 se realizaron tres colectas del material en el mes correspondiente a la parte central de la estación. Por lo que se realizó el levantamiento del material combustible los meses Abril, Julio, Octubre de 2005 y Enero de 2006. El poder calorífico obtenido, HHV, se utiliza para determinar el LHV con la ayuda del valor de humedad y de la concentración de hidrógeno.

Primavera 2005			
Muestra	Especie	HHV	LHV
M1	<i>Pinus oocarpa</i> natural	20.330,50	17.659,68
M2	<i>Acacia pennatula</i> natural	19.186,00	16.478,31
M3	<i>Quercus resinosa</i> natural	19.495,35	16.927,02
M4	<i>Pinus oocarpa</i> plantación	20.342,77	17.772,91
M5	<i>Pinus douglasiana</i> plantación	20.343,04	17.589,70
M5s	Sustrato de <i>P. douglasiana</i>	19.705,97	18.130,58
M6	<i>Pinus devoniana</i> plantación	20.726,29	17.861,32
M10	<i>Quercus resinosa</i>	18.638,85	18.638,85
M11	<i>Clethra rosei</i>	18.148,52	15.480,69
M14	<i>Verbesina greenmanii</i>	18.448,69	15.430,69
M20	<i>Pinus pseudostrobus</i>	20.374,84	17.537,30
M20s	Sustrato de <i>P. pseud</i>	20.338,21	20.338,21
M24	<i>Quercus magnolifolia</i>	18.875,69	16.807,86

Tabla 17. Valores HHV y LHV de la estación de primavera 2005.

Verano 2005			
Muestra	Especie	HHV	LHV
M1	<i>Pinus oocarpa</i> natural	19.822,84	17.110,59
M2	<i>Acacia pennatula</i> natural	20.359,84	17.666,49
M3	<i>Quercus resinosa</i> natural	19.112,31	16.575,51
M4	<i>Pinus oocarpa</i> plantación	19.762,21	16.913,79
M5	<i>Pinus douglasiana</i> plantación	19.478,80	16.461,81
M5s	Sustrato de <i>P. douglasiana</i>	19.689,16	17.549,96
M6	<i>Pinus devoniana</i> plantación	21.101,22	18.225,07
M10	<i>Quercus resinosa</i>	18.797,69	18.797,69
M11	<i>Clethra rosei</i>	18.593,83	15.772,61
M14	<i>Verbesina greenmanii</i>	17.791,64	14.552,87
M20	<i>Pinus pseudostrobus</i>	22.276,26	19.433,54
M20s	Sustrato <i>P. pseud</i>	19.284,13	19.284,13
M24	<i>Quercus magnolifolia</i>	17.042,87	14.828,64

Tabla 18. Valores HHV y LHV de la estación de verano 2005.

Otoño 2005			
Muestra	Especie	HHV	LHV
M1	<i>Pinus oocarpa</i> natural	20.118,15	17.604,12
M2	<i>Acacia pennatula</i> natural	19.459,81	16.842,30
M3	<i>Quercus resinosa</i> natural	18.398,87	16.022,95
M4	<i>Pinus oocarpa</i> plantación	19.714,40	17.025,57
M5	<i>Pinus douglasiana</i> plantación	19.896,60	17.108,29
M5s	Sustrato de <i>P. douglasiana</i>	18.965,52	17.437,47
M6	<i>Pinus devoniana</i> plantación	20.344,01	17.541,03
M10	<i>Quercus resinosa</i>	17.783,98	17.783,98
M11	<i>Clethra rosei</i>	18.052,93	15.372,36
M14	<i>Verbesina greenmanii</i>	18.926,20	16.020,32
M20	<i>Pinus pseudostrobus</i>	20.199,18	17.435,53
M20s	Sustrato <i>P. pseud</i>	19.767,11	19.767,11
M24	<i>Quercus magnolifolia</i>	18.881,87	16.335,52

Tabla 19. Valores HHV y LHV de la estación de otoño 2005.

Invierno 2005			
Muestra	Especie	HHV	LHV
M1	<i>Pinus oocarpa</i> natural	19.280,42	16.603,70
M2	<i>Acacia pennatula</i> natural	17.651,46	15.189,42
M3	<i>Quercus resinosa</i> natural	17.657,77	15.368,94
M4	<i>Pinus oocarpa</i> plantación	17.737,44	14.903,49
M5	<i>Pinus douglasiana</i> plantación	20.123,63	17.437,80
M5s	Sustrato de <i>P. douglasiana</i>	19.897,22	18.322,46
M6	<i>Pinus devoniana</i> plantación	20.246,57	17.405,20
M10	<i>Quercus resinosa</i>	17.737,44	14.903,23
M11	<i>Clethra rosei</i>	17.815,16	14.749,84
M14	<i>Verbesina greenmanii</i>	17.003,85	13.938,53
M20	<i>Pinus pseudostrobus</i>	20.137,25	17.844,97
M20s	Sustrato <i>P. pseudostrobus</i>	19.534,00	17.245,39
M24	<i>Quercus magnolifolia</i>	17.190,42	17.241,72

Tabla 20. Valores HHV y LHV de la estación de invierno 2005.

Con lo que respecta al poder calorífico podemos destacar que de acuerdo a la clasificación realizada por Núñez *et al.*, 2000 (a) se tuvo que realizar una nueva reclasificación de los valores debido a que los valores que se presentaron en las determinaciones se encontraban por debajo de la clasificación anteriormente mencionada. Por lo que de acuerdo a los valores obtenidos se modificaron los rangos por lo que la nueva clasificación quedó tal como se muestra en las Tabla 21 y Tabla 21 a. En ellas podemos observar el riesgo del poder calorífico que corresponde para cada especie en cada una de las 4 estaciones del 2005.

CATEGORÍAS	CLAVE DE COLOR	$\text{kJ kg}^{-1}$
1		<17.500
2		17.501-19.001
3		19.002-20.502
4		20.503-22.003
5		>22.004

Tabla 21. Clasificación de poderes caloríficos y claves de colores asignadas.

2005		HHV			
Muestra	Especie	P	V	O	I
M1	<i>Pinus oocarpa</i> natural	3	3	4	3
M2	<i>Acacia pennatula</i> natural	3	3	3	2
M3	<i>Quercus resinosa</i> natural	3	3	2	2
M4	<i>Pinus oocarpa</i> plantación	3	3	3	2
M5	<i>Pinus douglasiana</i> plantación	3	3	3	3
M5s	Sustrato de <i>P. douglasiana</i>	3	3	2	3
M6	<i>Pinus devoniana</i> plantación	4	4	3	3
M10	<i>Quercus resinosa</i>	2	2	2	2
M11	<i>Clethra rosei</i>	2	2	2	2
M14	<i>Verbesina greenmanii</i>	2	2	2	1
M20	<i>Pinus pseudostrobus</i>	3	3	3	3
M20s	Sustrato <i>P. pseudostrobus</i>	3	3	3	3
M24	<i>Quercus magnolifolia</i>	2	2	2	1

Tabla 21 a. Clasificación del índice de riesgo de especies con respecto a su poder calorífico.

#### 4.3. Ensayos de inflamabilidad de combustibles forestales

En este apartado se analizan los resultados de las experiencias de Inflamabilidad de 15 especies mexicanas.

Las experiencias se realizaron utilizando un epirradiador siguiendo el método propuesto por Valette y Elvira, 1989. En el desarrollo se utilizó un Epirradiador normalizado, para cada especie por estación se realizaron solamente 25 determinaciones. Los resultados se muestran en la Tabla 22.

Pruebas de Inflamabilidad en 2005					
Muestra	Género-Especies	Primavera	Verano	Otoño	Invierno
M1	<i>Pinus oocarpa</i> Schiede ex Schlechtendal. "plt"	5	5	5	5
M2	<i>Acacia pennatula</i> (Schlecht & Cham.) Benth. nat"	5	5	5	5
M3	<i>Quercus resinosa</i> Liemb. "nat"	5	5	5	5
M4	<i>Pinus oocarpa</i> Schiede ex Schlechtendal. "plt"	5	5	5	5
M5	<i>Pinus douglasiana</i> Martínez. "plt"	5	5	5	5
M5s	<i>Pinus douglasiana</i> Martínez. "Sustrato de plt"	5	5	5	5
M6	<i>Pinus devoniana</i> Lindley. "plt"	5	5	5	5
M7	<i>Rhynchelytrum repen</i> Will	5	5	5	5
M10	<i>Quercus resinosa</i> Liemb. "nat"	5	5	5	5
M11	<i>Clethra rosei</i> Britton- "nat"	5	5	5	5
M14	<i>Verbesina greenmanii</i> Urb. "nat"	5	5	5	5
M18	<i>Pinus halepensis</i> (Right)- "plt"	5	5	5	5
M19	<i>Eucalyptus camaldulensis</i> Dehn. "plt"	5	5	5	5
M20	<i>Pinus pseudostrobus</i>	5	5	5	5
M24	<i>Quercus magnolifolia</i> Née. "nat"	5	5	5	5

Tabla 22. Determinaciones de ensayos de inflamabilidad para las cuatro estaciones ("nat", natural y "plt" plantación).

#### 4.4. Procedimientos para determinar los parámetros químicos elementales

La información de la composición química elemental como son C, H, O, N, y S nos proporcionan información para calcular el poder calorífico inferior (LHV) para las especies del área protegida flora y fauna en la Sierra de la Primavera (Jalisco, México).

La determinación de estos elementos se muestra en las siguientes Tablas que se presentan para cada una estación del año y que fueron evaluadas solamente 13 especies. Como se puede observar la Muestra M3 y M10 (*Quercus resinosa*) es la misma especie pero con diferentes condiciones de humedad la zona que se encuentran establecidas, M18 *Pinus halepensis*, M19 *Eucalyptus camaldulensis*, no fueron evaluadas para esta condición ya que existen pequeños relictos de estas especies, la especie de *E. camaldulensis* fue eliminada posteriormente al ingreso de su plaga exótica de *Glycaspis brimblecombei*. Cabe mencionar que se para cada especie se realizaron por duplicado por lo que el valor que aparece es un promedio.

Composición química elemental primavera 2005						
Muestra	Género-Especies	N	C	H	O	S
M1	<i>Pinus oocarpa</i> Schiede ex Schlechtendal. "plt"	1,23	50,41	6,78	41,58	0,00
M2	<i>Acacia pennatula</i> (Schlecht & Cham.) Benth. "nat"	2,43	53,01	6,17	38,39	0,00
M3	<i>Quercus resinosa</i> Liemb. "nat"	1,37	49,35	6,23	43,06	0,00
M4	<i>Pinus oocarpa</i> Schiede ex Schlechtendal. "plt"	1,12	51,19	6,73	40,96	0,00
M5	<i>Pinus douglasiana</i> Martínez. "plt"	0,99	50,95	6,84	41,22	0,00
M5s	<i>Pinus douglasiana</i> Martínez. "Sustrato de plt"	0,41	51,92	6,52	41,15	0,00
M6	<i>Pinus devoniana</i> Lindley. "plt"	1,08	52,82	6,80	39,29	0,00
M10	<i>Clethra rosei</i> Britton- "nat"	1,54	47,48	6,49	44,49	0,00
M11	<i>Verbesina greenmanii</i> Urb. "nat"	0,97	49,45	6,06	43,52	0,00
M14	<i>Pinus pseudostrobus</i>	2,17	44,77	5,94	47,12	0,00
M19	<i>Quercus magnolifolia</i> Née. "nat"	1,67	51,19	7,03	40,12	0,00
M20	<i>Pinus pseudostrobus</i>	1,38	52,25	6,93	39,44	0,00
M24	<i>Quercus magnolifolia</i> Née. "nat"	1,92	50,93	6,48	40,67	0,00

Tabla 23. Composición química elemental de primavera 2005 ("nat", natural y "plt" plantación).

Composición química elemental verano 2005						
Muestra	Género-Especies	N	C	H	O	S
M1	<i>Pinus oocarpa</i> Schiede ex Schlechtendal. "plt"	1,0	64,7	6,4	27,90	0,00
M2	<i>Acacia pennatula</i> (Schlecht & Cham.) Benth. nat"	2,5	51,6	6,2	39,71	0,00
M3	<i>Quercus resinosa</i> Liemb. "nat"	1,5	49,4	6,2	42,84	0,00
M4	<i>Pinus oocarpa</i> Schiede ex Schlechtendal. "plt"	1,2	51,2	6,8	40,78	0,00
M5	<i>Pinus douglasiana</i> Martínez. "plt"	1,2	50,3	6,6	41,78	0,00
M5s	<i>Pinus douglasiana</i> Martínez. "Sustrato de plt"	0,5	49,8	6,1	43,61	0,00
M6	<i>Pinus devoniana</i> Lindley. "plt"	1,2	51,1	6,7	41,09	0,00
M11	<i>Clethra rosei</i> Britton- "nat"	1,3	47,7	5,8	45,17	0,00
M14	<i>Verbesina greenmanii</i> Urb. "nat"	3,2	46,6	5,9	44,27	0,00
M20	<i>Pinus pseudostrobus</i>	1,6	52,2	6,7	39,53	0,00
M24	<i>Quercus magnolifolia</i> Née. "nat"	0,8	37,7	4,5	57,05	0,00

Tabla 24. Composición química elemental de verano ("nat", natural y "plt" plantación) 2005.

Composición química elemental otoño 2005						
Muestra	Género-Especies	N	C	H	O	S
M1	<i>Pinus oocarpa</i> Schiede ex Schlechtendal. "plt"	1,0	49,3	6,4	43,27	0,00
M2	<i>Acacia pennatula</i> (Schlecht & Cham.) Benth. "nat"	2,0	52,0	6,3	39,66	0,00
M3	<i>Quercus resinosa</i> Liemb. "nat"	1,3	49,4	6,0	43,26	0,00
M4	<i>Pinus oocarpa</i> Schiede ex Schlechtendal. "plt"	1,1	50,1	6,6	42,20	0,00
M5	<i>Pinus douglasiana</i> Martínez. "plt"	1,1	50,4	6,6	41,90	0,00
M5s	<i>Pinus douglasiana</i> Martínez. "Sustrato de plt"	0,8	46,4	6,1	46,77	0,00
M6	<i>Pinus devoniana</i> Lindley. "plt"	1,1	50,4	6,5	42,08	0,00
M11	<i>Clethra rosei</i> Britton- "nat"	1,5	48,3	6,1	44,15	0,00
M14	<i>Verbesina greenmanii</i> Urb. "nat"	2,7	46,5	6,0	44,88	0,00
M20	<i>Pinus pseudostrobus</i>	1,8	50,2	6,5	41,46	0,00
M24	<i>Quercus magnolifolia</i> Née. "nat"	1,3	46,7	5,9	46,07	0,00

Tabla 25. Composición química elemental de otoño 2005 ("nat", natural y "plt" plantación).

Composición química elemental invierno 2005						
Muestra	Género-Especies	N	C	H	O	S
M1	<i>Pinus oocarpa</i> Schiede ex Schlechtendal. "plt"	0,7	49,3	6,5	43,46	0,00
M2	<i>Acacia pennatula</i> (Schlecht & Cham.) Benth. "nat"	2,3	51,0	6,3	40,39	0,00
M3	<i>Quercus resinosa</i> Liemb. "nat"	1,2	48,9	6,0	43,94	0,00
M4	<i>Pinus oocarpa</i> Schiede ex Schlechtendal. "plt"	1,3	51,3	6,9	40,48	0,00
M5	<i>Pinus douglasiana</i> Martínez. "plt"	1,2	50,9	6,8	41,15	0,00
M5s	<i>Pinus douglasiana</i> Martínez. "Sustrato de plt"	0,5	49,5	6,4	43,57	0,00
M6	<i>Pinus devoniana</i> Lindley. "plt"	1,0	50,9	6,8	41,26	0,00
M11	<i>Clethra rosei</i> Britton- "nat"	1,2	47,5	5,9	45,39	0,00
M14	<i>Verbesina greenmanii</i> Urb. "nat"	2,8	45,1	5,8	46,34	0,00
M20	<i>Pinus pseudostrobus</i>	1,6	51,7	6,8	39,88	0,00
M24	<i>Quercus magnolifolia</i> Née. "nat"	1,3	48,7	6,0	43,93	0,00

Tabla 26. Composición química elemental de invierno 2005 ("nat", natural y "plt" plantación).

#### 4.5. Datos de humedad, densidad y cenizas de bomba y extracto en (%)

Todas las muestras, y por recomendación del Dr. Lisardo Núñez Regueira<sup>+</sup>, se muestrea en el mes central que corresponde a cada estación, por lo que se debería muestrear en un mismo mes tres colectas.

A cada colecta se le determinó la humedad bajo la metodología de peso constante, por lo que para cada especie se contaba con un total de 6 muestras de las tres colectas. En total se colectaron 15 especies diferentes para cada estación. Con las seis muestras se realizó un promedio así como su desviación estándar. Estos valores se muestran en las siguientes Tablas.

Porcentaje de humedad en primavera 2005			
Muestra	Género-Especies	Porcentaje (%)	Desviación estándar
M1	<i>Pinus oocarpa</i> Schiede ex Schlechtendal. "plt"	48,35	0,35
M2	<i>Acacia pennatula</i> (Schlecht & Cham.) Benth. "nat"	55,37	3,49
M3	<i>Quercus resinosa</i> Liemb. "nat"	49,09	0,72
M4	<i>Pinus oocarpa</i> Schiede ex Schlechtendal. "plt"	44,71	2,32
M5	<i>Pinus douglasiana</i> Martínez. "plt"	51,23	0,55
M5s	<i>Pinus douglasiana</i> Martínez. "Sustrato de plt"	5,85	0,39
M6	<i>Pinus devoniana</i> Lindley. "plt"	56,13	1,52
M7	<i>Rhynchelytrum repen</i> Will	52,91	0,60
M10	<i>Quercus resinosa</i> Liemb. "nat"	52,63	0,37
M11	<i>Clethra rosei</i> Britton- "nat"	54,73	1,28
M14	<i>Verbesina greenmanii</i> Urb. "nat"	70,17	5,57
M18	<i>Pinus halepensis</i> (Right)- "plt"	50,17	7,01
M19	<i>Eucalyptus camaldulensis</i> Dehn. "plt"	46,39	3,03
M20	<i>Pinus pseudostrabus</i>	53,85	4,10
M24	<i>Quercus magnolifolia</i> Née. "nat"	26,36	28,16

Tabla 27. Determinación de humedad para la estación de primavera 2005 ("nat", natural y "plt" plantación).

Porcentaje de humedad en verano 2005			
Muestra	Género-Especies	Porcentaje (%)	Desviación estándar
M1	<i>Pinus oocarpa</i> Schiede ex Schlechtendal. "plt"	53,12	1,74
M2	<i>Acacia pennatula</i> (Schlecht & Cham.) Benth. "nat"	54,58	7,25
M3	<i>Quercus resinosa</i> Liemb. "nat"	48,21	0,86
M4	<i>Pinus oocarpa</i> Schiede ex Schlechtendal. "plt"	55,20	3,53
M5	<i>Pinus douglasiana</i> Martínez. "plt"	63,74	0,82
M5s	<i>Pinus douglasiana</i> Martínez. "Sustrato de plt"	32,79	13,46
M6	<i>Pinus devoniana</i> Lindley. "plt"	57,85	0,49
M7	<i>Rhynchelytrum repen</i> Will	70,99	6,77
M10	<i>Quercus resinosa</i> Liemb. "nat"	50,47	0,18
M11	<i>Clethra rosei</i> Britton- "nat"	62,95	2,10
M14	<i>Verbesina greenmanii</i> Urb. "nat"	79,42	0,80
M18	<i>Pinus halepensis</i> (Right)- "plt"	50,91	1,29
M19	<i>Eucalyptus camaldulensis</i> Dehn. "plt"	50,00	1,95
M20	<i>Pinus pseudostrabus</i>	56,20	2,41
M24	<i>Quercus magnolifolia</i> Née. "nat"	49,99	1,03

Tabla 28. Determinación de humedad para la estación de verano 2005 ("nat", natural y "plt" plantación).

Porcentaje de humedad en otoño 2005			
Muestra	Género-Especies	Porcentaje (%)	Desviación estándar
M1	<i>Pinus oocarpa</i> Schiede ex Schlechtendal. "plt"	44,94	3,50
M2	<i>Acacia pennatula</i> (Schlecht & Cham.) Benth. "nat"	50,21	1,02
M3	<i>Quercus resinosa</i> Liemb. "nat"	43,42	2,14
M4	<i>Pinus oocarpa</i> Schiede ex Schlechtendal. "plt"	50,78	1,46
M5	<i>Pinus douglasiana</i> Martínez. "plt"	54,67	0,89
M5s	<i>Pinus douglasiana</i> Martínez. "Sustrato de plt"	7,95	2,45
M6	<i>Pinus devoniana</i> Lindley. "plt"	56,49	1,39
M7	<i>Rhynchelytrum repen</i> Hill	56,41	2,97
M10	<i>Quercus resinosa</i> Liemb. "nat"	48,40	1,07
M11	<i>Clethra rosei</i> Britton- "nat"	54,96	1,57
M14	<i>Verbesina greenmanii</i> Urb. "nat"	65,02	5,76
M18	<i>Pinus halepensis</i> (Right)- "plt"	48,38	2,10
M19	<i>Eucalyptus camaldulensis</i> Dehn. "plt"	48,68	8,91
M20	<i>Pinus pseudostrobus</i>	54,38	6,97
M24	<i>Quercus magnolifolia</i> Née. "nat"	51,38	0,97

Tabla 29. Determinación de humedad para la estación de otoño 2005 ("nat", natural y "plt" plantación).

Porcentaje de humedad en invierno 2005			
Muestra	Género-Especies	Porcentaje (%)	Desviación estándar
M1	<i>Pinus oocarpa</i> Schiede ex Schlechtendal. "plt"	50,77	0,92
M2	<i>Acacia pennatula</i> (Schlecht & Cham.) Benth. "nat"	44,44	0,19
M3	<i>Quercus resinosa</i> Liemb. "nat"	39,57	0,05
M4	<i>Pinus oocarpa</i> Schiede ex Schlechtendal. "plt"	53,63	0,14
M5	<i>Pinus douglasiana</i> Martínez. "plt"	48,83	0,10
M5s	<i>Pinus douglasiana</i> Martínez. "Sustrato de plt"	6,54	0,20
M6	<i>Pinus devoniana</i> Lindley. "plt"	54,74	0,19
M7	<i>Rhynchelytrum repen</i> Will	60,39	2,27
M10	<i>Quercus resinosa</i> Liemb. "nat"	39,79	1,02
M11	<i>Clethra rosei</i> Britton- "nat"	62,70	1,24
M14	<i>Verbesina greenmanii</i> Urb. "nat"	73,64	7,38
M18	<i>Pinus halepensis</i> (Right)- "plt"	51,89	0,21
M19	<i>Eucalyptus camaldulensis</i> Dehn. "plt"	44,85	0,39
M20	<i>Pinus pseudostrobus</i>	57,51	0,23
M24	<i>Quercus magnolifolia</i> Née. "nat"	39,50	0,29

Tabla 30. Determinación de humedad para la estación de invierno 2005 ("nat", natural y "plt" plantación).

La densidad se realizó mediante picnometría y este resultado fue incluido directamente en la creación del modelo para determinar los índices de riesgo. Esta prueba, al igual que otras más en la investigación, no se ha realizado en México. Con lo se refiere al porcentaje de cenizas esta evaluación no se realizó posteriormente a las experiencias calorimétricas, ya que desde un inicio no se contempló.

Por la gran complejidad y diversidad de especies vegetales en México aún no se cuenta con un estudio completo de las especies forestales con respecto al contenido de extractos, entre lo que podemos determinar: resinas, aceites y ceras. Dentro del complejo extracto podemos tener estos tres grupos, por lo que para determinar la cantidad de cada grupo antes mencionado es necesario realizar la separación de éstos mediante procesos con solventes.

Para ello se contó solamente con la determinación del porcentaje de extracto para las especies que posteriormente se describen.

Porcentaje de extracto de primavera 2005		
Muestra	Género-Especies	Porcentaje % de extracto
M1	<i>Pinus oocarpa</i> Schiede ex Schlechtendal. "plt"	14,94
M2	<i>Acacia pennatula</i> (Schlecht & Cham.) Benth. "nat"	8,29
M3	<i>Quercus resinosa</i> Liemb. "nat"	12,40
M4	<i>Pinus oocarpa</i> Schiede ex Schlechtendal. "plt"	11,84
M5	<i>Pinus douglasiana</i> Martínez. "plt"	20,77
M5s	<i>Pinus douglasiana</i> Martínez. "Sustrato de plt"	11,29
M6	<i>Pinus devoniana</i> Lindley. "plt"	13,21
M7	<i>Rhynchelytrum repen</i> Will	4,22
M10	<i>Quercus resinosa</i> Liemb. "nat"	9,53
M11	<i>Clethra rosei</i> Britton- "nat"	7,41
M14	<i>Verbesina greenmanii</i> Urb. "nat"	8,88
M18	<i>Pinus halepensis</i> (Right)- "plt"	13,38
M19	<i>Eucalyptus camaldulensis</i> Dehn. "plt"	19,80
M20	<i>Pinus pseudostrobus</i>	10,55
M24	<i>Quercus magnolifolia</i> Née. "nat"	11,81

Tabla 31. Determinación de porcentaje de extracto para la estación de primavera 2005 ("nat", natural y "plt" plantación).

Porcentaje de extracto de verano 2005		
Muestra	Género-Especies	Porcentaje % de extracto
M1	<i>Pinus oocarpa</i> Schiede ex Schlechtendal. "plt"	7,46
M2	<i>Acacia pennatula</i> (Schlecht & Cham.) Benth. "nat"	4,84
M3	<i>Quercus resinosa</i> Liemb. "nat"	7,75
M4	<i>Pinus oocarpa</i> Schiede ex Schlechtendal. "plt"	7,52
M5	<i>Pinus douglasiana</i> Martínez. "plt"	19,21
M5s	<i>Pinus douglasiana</i> Martínez. "Sustrato de plt"	7,66
M6	<i>Pinus devoniana</i> Lindley. "plt"	20,97
M7	<i>Rhynchelytrum repen</i> Will	2,15
M10	<i>Quercus resinosa</i> Liemb. "nat"	9,78
M11	<i>Clethra rosei</i> Britton- "nat"	4,77
M14	<i>Verbesina greenmanii</i> Urb. "nat"	4,58
M18	<i>Pinus halepensis</i> (Right)- "plt"	18,65
M19	<i>Eucalyptus camaldulensis</i> Dehn. "plt"	24,61
M20	<i>Pinus pseudostrobus</i>	18,53
M24	<i>Quercus magnolifolia</i> Née. "nat"	10,33

Tabla 32. Determinación de porcentaje de extracto para la estación de verano 2005 ("nat", natural y "plt" plantación).

Porcentaje de extracto de otoño 2005		
Muestra	Género-Especies	Porcentaje % de extracto
M1	<i>Pinus oocarpa</i> Schiede ex Schlechtendal. "plt"	8,79
M2	<i>Acacia pennatula</i> (Schlecht & Cham.) Benth. "nat"	10,39
M3	<i>Quercus resinosa</i> Liemb. "nat"	15,84
M4	<i>Pinus oocarpa</i> Schiede ex Schlechtendal. "plt"	8,30
M5	<i>Pinus douglasiana</i> Martínez. "plt"	16,11
M5s	<i>Pinus douglasiana</i> Martínez. "Sustrato de plt"	6,90
M6	<i>Pinus devoniana</i> Lindley. "plt"	15,97
M7	<i>Rhynchelytrum repen</i> Will	2,33
M10	<i>Quercus resinosa</i> Liemb. "nat"	11,12
M11	<i>Clethra rosei</i> Britton- "nat"	13,51
M14	<i>Verbesina greenmanii</i> Urb. "nat"	6,57
M18	<i>Pinus halepensis</i> (Right)- "plt"	17,35
M19	<i>Eucalyptus camaldulensis</i> Dehn. "plt"	28,97
M20	<i>Pinus pseudostrobus</i>	8,49
M24	<i>Quercus magnolifolia</i> Née. "nat"	10,50

Tabla 33. Determinación de porcentaje de extracto para la estación de otoño 2005 ("nat", natural y "plt" plantación).

Porcentaje de extracto de invierno 2005		
Muestra	Género-Especies	Porcentaje % de extracto
M1	<i>Pinus oocarpa</i> Schiede ex Schlechtendal. "plt"	14,41
M2	<i>Acacia pennatula</i> (Schlecht & Cham.) Benth. "nat"	17,86
M3	<i>Quercus resinosa</i> Liemb. "nat"	9,49
M4	<i>Pinus oocarpa</i> Schiede ex Schlechtendal. "plt"	10,26
M5	<i>Pinus douglasiana</i> Martínez. "plt"	17,63
M5s	<i>Pinus douglasiana</i> Martínez. "Sustrato de plt"	16,74
M6	<i>Pinus devoniana</i> Lindley. "plt"	22,83
M7	<i>Rhynchelytrum repen</i> Will	2,54
M10	<i>Quercus resinosa</i> Liemb. "nat"	13,83
M11	<i>Clethra rosei</i> Britton- "nat"	5,63
M14	<i>Verbesina greenmanii</i> Urb. "nat"	6,48
M18	<i>Pinus halepensis</i> (Right)- "plt"	20,84
M19	<i>Eucalyptus camaldulensis</i> Dehn. "plt"	25,30
M20	<i>Pinus pseudostrobus</i>	19,61
M24	<i>Quercus magnolifolia</i> Née. "nat"	11,20

Tabla 34. Determinación de porcentaje de extracto para la estación de invierno 2005 ("nat", natural y "plt" plantación).

#### **4.6. Elaboración de tablas de índice de riesgos**

Desarrollada la parte experimental y obtenidos los resultados, se pasa a la parte de elaboración de Tablas donde se valora los parámetros estudiados de una manera conjunta. Cada uno de los parámetros de una manera individual tiene una importancia en su influencia en el índice de riesgo de cada una de las especies consideradas. Cada valor obtenido establece los criterios que son la base del estado que se encontrará el árbol a través de cada estación, siendo posible la predicción dentro de los márgenes y en función de los parámetros climáticos principalmente. Mediante este proceso se podrá determinar el momento en que se pueda presentar un incendio forestal. Las variables principales para establecer estos índices de riesgo son el poder calorífico y la inflamabilidad. Mediante la determinación de éstos dos parámetros, se consideran otros más como son parámetros biológicos, climáticos y ambiente físico.

Los cuáles cada uno de ellos presentan un valor de importancia e influencia de una manera individual e indistinta. Para establecer este proceso a continuación en la Figura 35, se muestra el desarrollo para determinar el riesgo para *Pinus oocarpa* Schiede ex Schlechtendal para la estación de primavera 2005 y para la estación verano se muestra en la Figura 36 en de una plantación con edad de 24 años localizado en el Campo Experimental Bosque Escuela localizado en la parte suroeste de la Sierra de la Primavera (Jalisco, México).



<b>PARÁMETROS TERMOQUÍMICOS</b>		<b>CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS</b>	
LHV	3	PRECIPITACIÓN	
Inflamabilidad	5	Cantidad alta	706
Riesgo	4	Cantidad baja	42.5
<b>PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS</b>		Cantidad muestra	92
Densidad alta	1087	Cantidad final	0.023822155
Densidad baja	771	Días de prec. muestra	5
Densidad muestra	795.4	Días de prec. Final	0
Densidad final	-0.025367089	TEMPERATURAS	
Humedad alta	68.9	Temperatura alta	33.1
Humedad baja	43.03	Temperatura baja	17.9
Humedad muestra	54.27	Temperatura muestra	33.1
Humedad final	0.008517588	Temperatura final	0.04
Cenizas altas	0.69	DISPONIBILIDAD	
Cenizas bajas	0.07	Disponibilidad alta	355
Cenizas muestra	0.31	Disponibilidad baja	63
Cenizas final	0.001129032	Disponibilidad muestra	63
<b>SUMA PARCIAL</b>	<b>-0.015720468</b>	Disponibilidad final	0.04
<b>CARACTERÍSTICAS BIOLÓGICAS</b>		HUMEDAD	
Actividad alta	8	Humedad alta	80
Actividad baja	1	Humedad baja	21
Actividad muestra	6	Humedad muestra	80
Actividad final	-0.005357143	Humedad final	-0.04
Aceites muestra	7.52	<b>SUMA PARCIAL</b>	<b>0.063822155</b>
Aceites final	0.01755	<b>OTROS PARÁMETROS</b>	
Edad muestra	23	VIENTO	
Edad final	0.045	Fuerza muestra	16.1
Habitat muestra	6	Fuerza final	0.02997
Habitat final	0.0025	Cantidad muestra	92
Residuos muestra	10	Cantidad final	0.1566
Residuos final	0.025	NUBOSIDAD	
Cubierta muestra	10	Cantidad muestra	5
Cubierta final	0.025	Cantidad final	0
Perenne-Caduco muestra	5	Regularidad muestra	5
Perenne-Caduco final	0	Regularidad final	0
Floración muestra	5	RADIACIÓN SOLAR	
Floración final	0	Cantidad muestra	5
<b>SUMA PARCIAL</b>	<b>0.109692857</b>	Cantidad final	0
		Periodicidad muestra	6
		Periodicidad final	0.00075
		TOPOGRAFÍA	
<b>ÍNDICE DE RIESGO PARCIAL:</b>	<b>4.346614544</b>	Topografía muestra	4
<b>ÍNDICE DE RIESGO FINAL:</b>	<b>4</b>	Topografía final	-0.003
		ANTRÓPICA	
		Antrópica muestra	6
		Antrópica final	0.0045
		<b>SUMA PARCIAL</b>	<b>0.18882</b>

Tabla 36. Determinación del riesgo de incendio forestal de *Pinus oocarpa* Schiede ex Schlechtendal para la estación verano 2005.

Recalcar que en esta fase del estudio, el poder calórico y la inflamabilidad fueron considerados los parámetros más importantes sin descartar otras variables de importancia vital en los incendios forestales.

Los parámetros se valoran entre los máximos y mínimos de acuerdo a cada lugar del estudio y a los cuáles se les asigna una importancia de 0 (nula influencia) a 1 (máxima influencia). Los parámetros que mayor se involucran en un incendio son considerados para este caso como positivos y los que no, como negativos. Al determinar la influencia de cada parámetro de manera individual se valora el resultado del poder calórico y la inflamabilidad. Posteriormente se redondea el valor a cifras enteras que se toma como el índice de riesgo para cada especie y estación de año.

#### **4.7. Diseño de mapas de índice de riesgo**

Una vez elaborados los índices de riesgo, base para la elaboración de los mapas, el uso de imágenes de satélite recientes, su procesamiento y el análisis de una clasificación no supervisada y supervisada ayuda a establecer los diferentes tipos de vegetación que se presentan en el área de estudio. Teniendo en cuenta que hasta la fecha no se cuenta con un mapa de vegetación ya sea mediante fotografías aéreas o imágenes de satélite, éste en un fuerte problema para elaborar los mapas. A partir de ahora y mediante este procedimiento se podrá establecer con una mayor precisión la elaboración de mapas. Con los datos correspondientes al índice de riesgo de cada tipo de vegetación y estación del año se tendrán las herramientas para generar un mapa de riesgo para toda el área forestal para cada una de las estaciones del año 2005.

Las claves de colores asignadas para los diferentes índices de riesgo para cada una de las especies y estación del año, las que se determinaron para la zona de estudio se presentan en la Tabla 37.

ÍNDICE	CLAVE DE COLOR
Índice de riesgo 1	Verde
Índice de riesgo 2	Azul
Índice de riesgo 3	Naranja
Índice de riesgo 4	Amarillo
Índice de riesgo 5	Rojo

Tabla 37. Índices de riesgo de incendio forestal y claves de colores asignadas.

Los mapas que posteriormente se muestran corresponden tanto al área natural protegida para Flora y Fauna de la Sierra de la Primavera (Jalisco, México) como al perímetro del área protegida, así como áreas forestales aledañas a la Sierra. Cabe mencionar que un primera acercamiento a la realización de mapas de riesgo son buenos, pero la separación espectral entre pixeles crean una fuerte confusión entre separar el pino del encino, mezclas de ambas especies, por lo que en primavera se tuvo un riesgo de 4 para *Quercus resinosa* (zona seca), *Eucalyptus camaldulensis*, *Pinus devoniana* y *P. halepensis*. Estas especies no se pudieron separar bien en la imagen. Para la estación de verano se presenta un riesgo de 5 para *Pinus oocarpa* natural, *Acacia pínatela*, *Quercus resinosa* (zona seca), *Eucalyptus camaldulensis* y *P. halepensis*. La estación de otoño prsento 5v solamente en *Eucalyptus camaldulensis*, y *P. halepensis* y riesgo de 2 para *Quercus resinosa* (zona seca). Para invierno se presento riesgo de 3 para *Pinus oocarpa* natural, sustrato de *Pinus devoniana* y *Eucalyptus camaldulensis*.

A continuación podemos observar los mapas de riesgo en las siguientes Figuras.

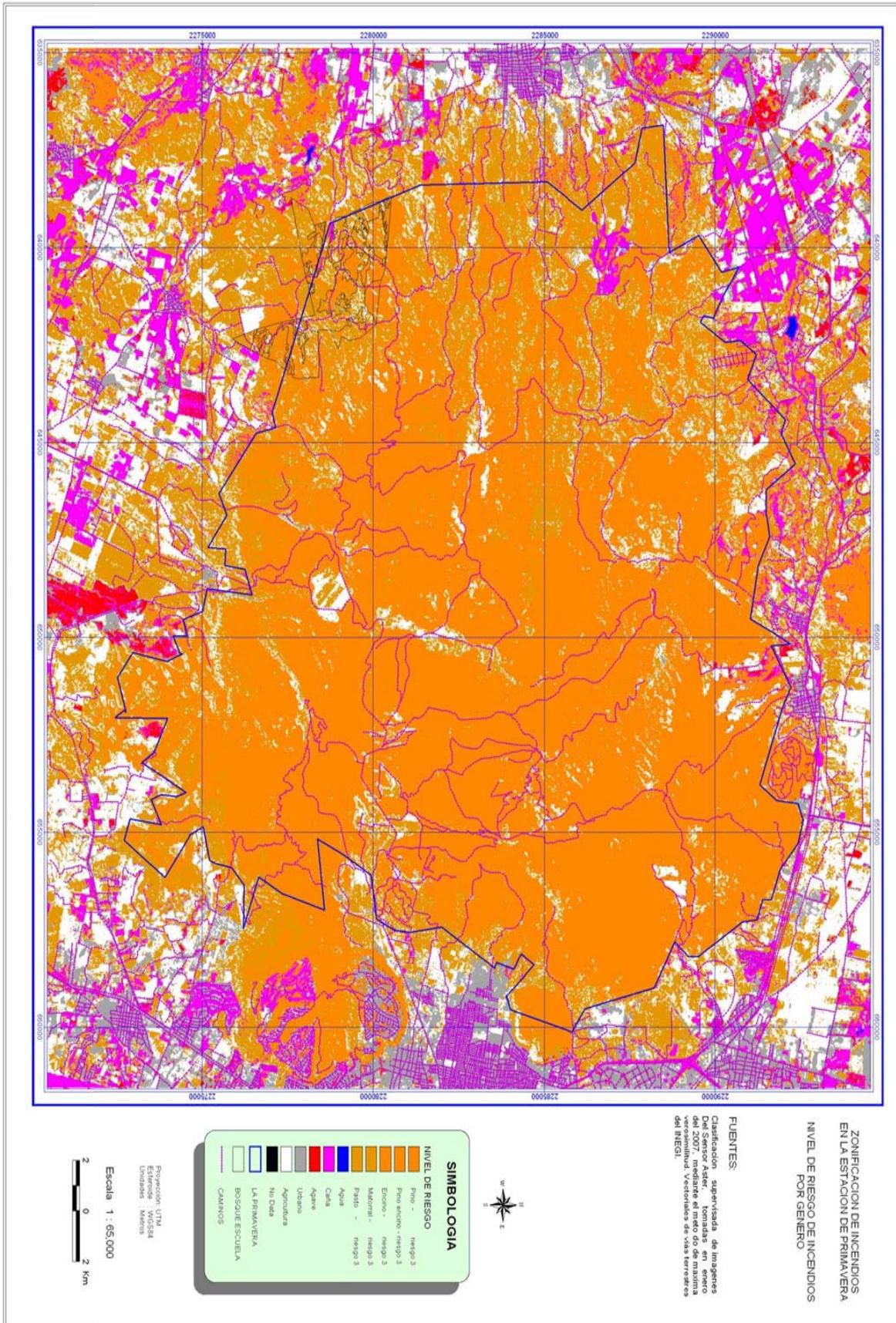


Figura 33. Índice de riesgo para primavera 2005.

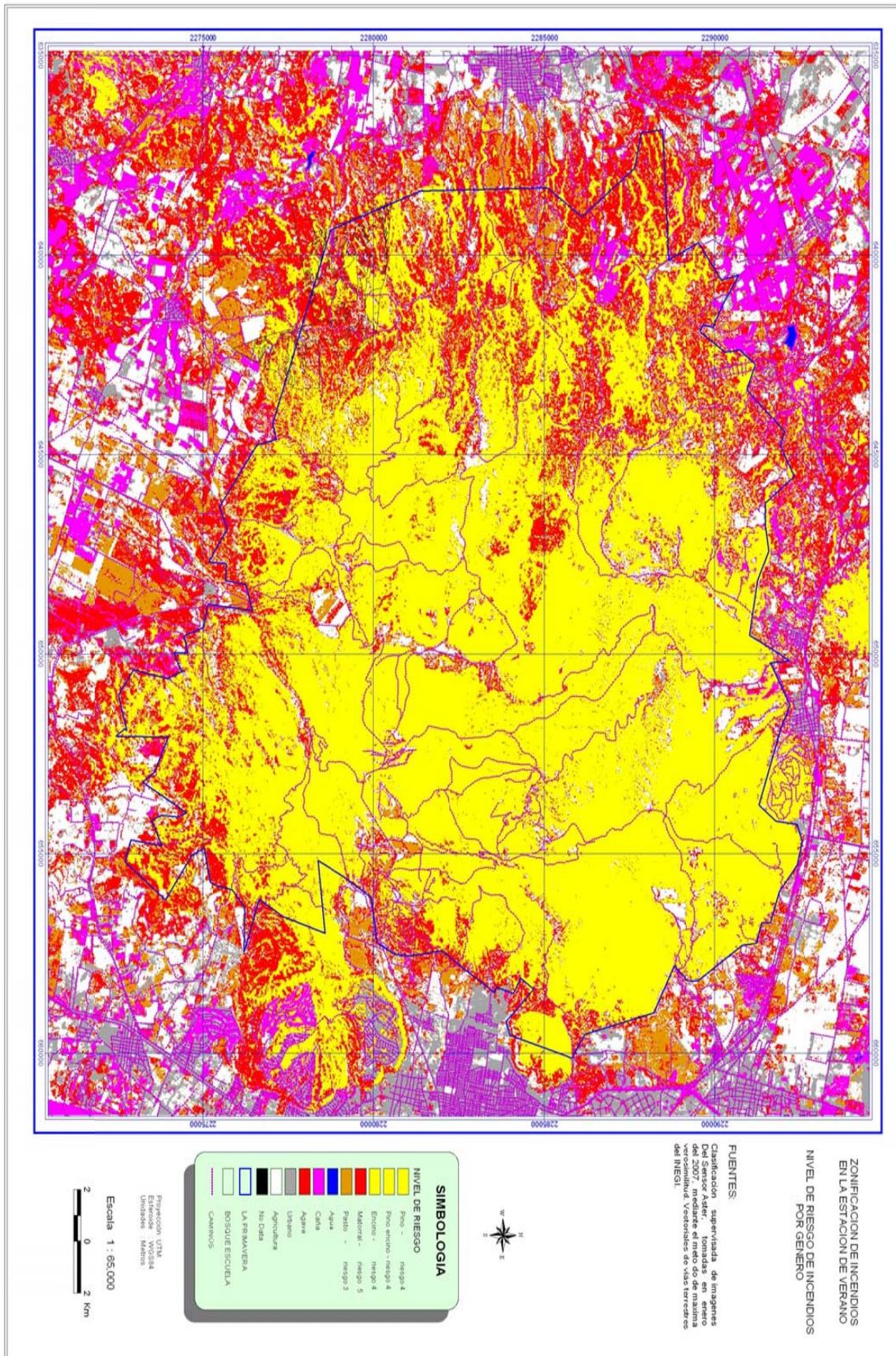


Figura 34. Índice de riesgo para verano 2005.

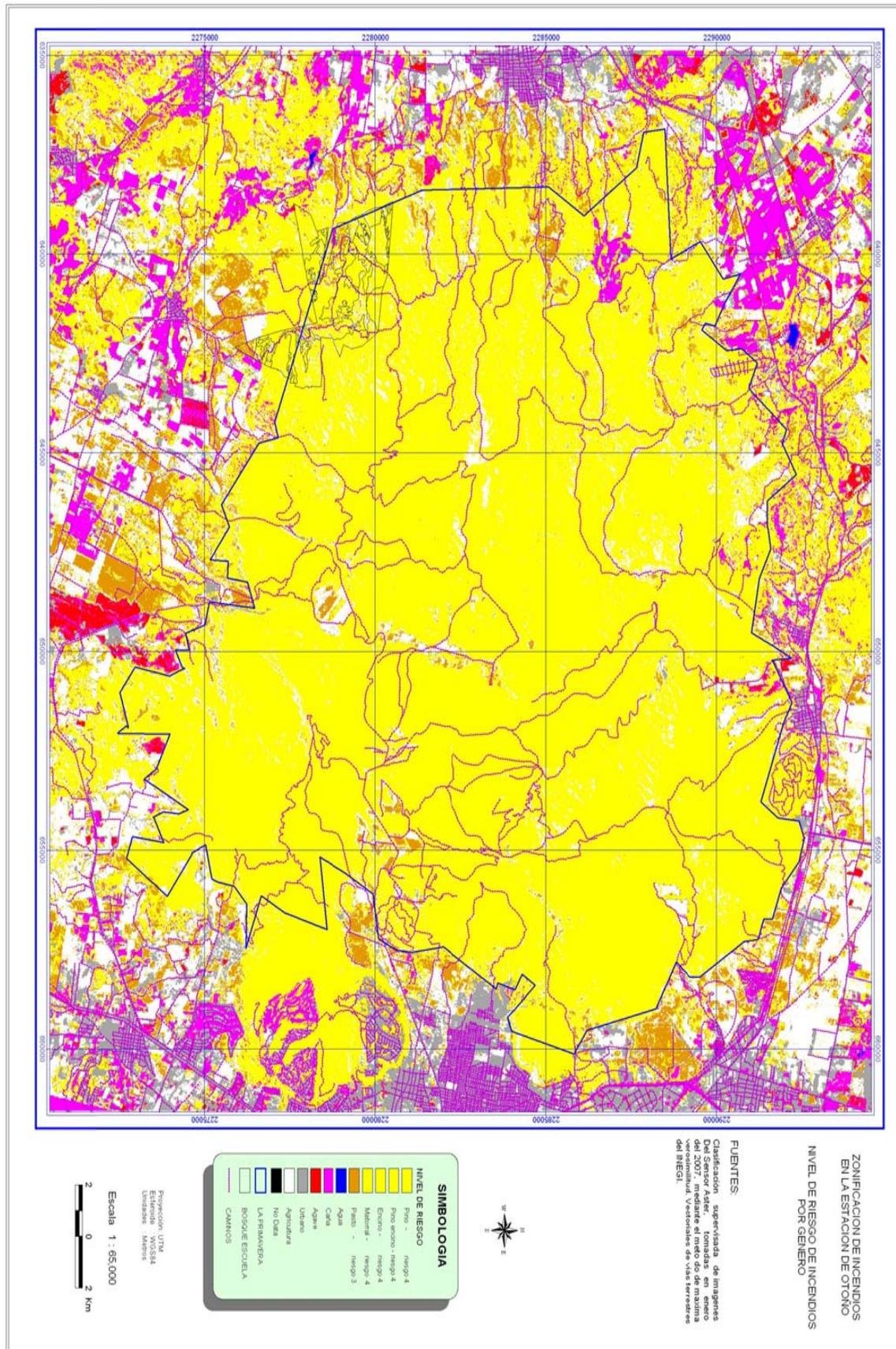


Figura 35. Índice de riesgo para otoño 2005.

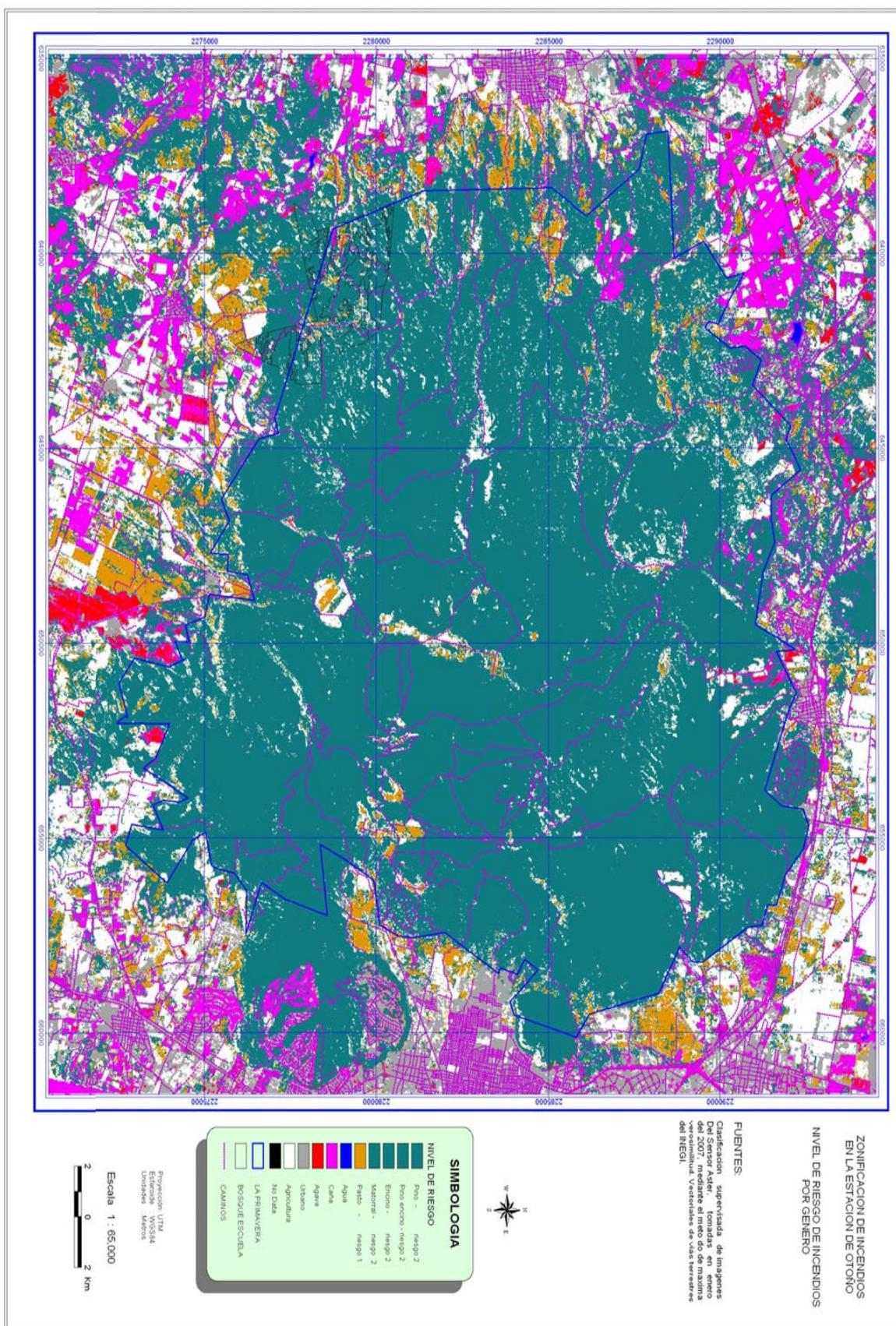


Figura 36. Índice de riesgo para invierno 2005.





## DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

## 5. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

El objetivo principal de este estudio corresponde fundamentalmente a la búsqueda de un programa preventivo de incendios forestales mediante la determinación de índices de riesgo en el área de protección de flora y fauna de la Sierra de la Primavera (Jalisco, México).

En los resultados obtenidos de las especies y estaciones del año se observa la importancia del poder calorífico e inflamabilidad a la hora de elaborar un índice de riesgo efectivo. A mayores, y de forma complementaria, para los ensayos de inflamabilidad será necesario el realizar una nueva clasificación, con lo referente a los tiempos de inflamabilidad para las especies vegetales de México, ya que en los ensayos de inflamabilidad realizados arrojaron valores muy altos de acuerdo a la clasificación de Valette, utilizada como referencia siguiendo el procedimiento propuesto por Proupin en 1998.

La posible alta inflamabilidad de las especies mexicanas se debe en gran medida a la cantidad de extractos que presentan estas especies, especialmente aceites, resinas y ceras. De la misma forma, y una vez revisada amplia bibliografía, se confirmó que tanto las resinas como los aceites esenciales presentan también altos valores de HHV. Lamentablemente a la fecha de hoy no se cuenta con información de la composición química para las especies mexicanas.

Para el futuro deberán abordarse de una manera más intraespecífica para cada especie forestal las determinaciones que no se han realizado en México, ya que a pesar de ser el país con mayor diversidad de pinos en el mundo no se les ha dado la importancia ni desde el punto de vista ambiental ni del aprovechamiento no maderable. Este poder calorífico e inflamabilidad de alguna manera han ocasionado los cambios de la dominancia de la vegetación en la región en las últimas décadas, estas favorecidas por la frecuencia e intensidad de los incendios forestales en la Sierra de la Primavera (Jalisco, México) que se presentan año con año y todo ello originado por la falta de programas preventivos.

Los dos parámetros físicos antes mencionados, poder calorífico e inflamabilidad, son básicos al elaborar en tiempo y forma los índices de riesgo de las especies forestales tanto en nuestra zona de estudio como en cualquiera otra parte. Estos parámetros básicos van a ser moderados con los otros parámetros analizados en el estudio, es decir, con aquellos de naturaleza química, biológica, climatológica, tiempos atmosféricos y los relacionados al ambiente físico. Por lo tanto el poder calorífico e inflamabilidad son prioritarios en el impacto incendio, esto es, en el inicio del mismo y en la posible energía liberada.

Por lo anterior podemos considerar que el análisis del poder calorífico facilita elaborar mapas energéticos, que determinan la valoración energética del ámbito forestal a través de su biomasa.

Ya evaluados los parámetros de poder calorífico e inflamabilidad de las especies forestales, éstas pueden ser clasificadas en función a éstos dos parámetros. Por lo que en la siguiente Tabla se muestran las especies evaluadas, así como su importancia en los incendios forestales para la estación de verano en el que predomina el riesgo 4.

Poder Calorífico		
Muestra	Género-especie	Valor
M1	<i>Pinus oocarpa Schiede ex Schlechtendal. "nat"</i>	5
M2	<i>Acacia pennatulata (Schlech &amp; Cham.) Benth. "nat"</i>	5
M3	<i>Quercus resinosa Liemb. "nat"</i>	5
M19	<i>Eucalyptus camaldulensis Dehn. "plt"</i>	5
M20	<i>Pinus pseudostrabus</i>	5
M4	<i>Pinus oocarpa Schiede ex Schlechtendal. "plt"</i>	4
M5	<i>Pinus douglasiana Martínez "plt"</i>	4
M5s	<i>Pinus douglasiana Martínez "plt"</i>	4
M6	<i>Pinus devoniana Lindley "plt"</i>	4
M10	<i>Quercus resinosa Liemb.</i>	4
M11	<i>Clethra rosei Britton</i>	4
M14	<i>Verbesina greenmanii Urb. "nat"</i>	4
M18	<i>Pinus halepensis</i>	4
M24	<i>Quercus magnoliifolia Née. "nat"</i>	4
M7	<i>Rhynchelytrum repen</i>	3

Inflamabilidad		
Muestra	Género-Especies	Valor
M1	<i>Pinus oocarpa</i> Schiede ex Schlechtendal. "plt"	5
M2	<i>Acacia pennatula</i> (Schlecht & Cham.) Benth. nat"	5
M3	<i>Quercus resinosa</i> Liemb. "nat"	5
M4	<i>Pinus oocarpa</i> Schiede ex Schlechtendal. "plt"	5
M5	<i>Pinus douglasiana</i> Martínez. "plt"	5
M5s	<i>Pinus douglasiana</i> Martínez. "Sustrato de plt"	5
M6	<i>Pinus devoniana</i> Lindley. "plt"	5
M7	<i>Rhynchelytrum repen</i> Will	5
M10	<i>Quercus resinosa</i> Liemb. "nat"	5
M11	<i>Clethra rosei</i> Britton- "nat"	5
M14	<i>Verbesina greenmanii</i> Urb. "nat"	5
M18	<i>Pinus halepensis</i> (Right)- "plt"	5
M19	<i>Eucalyptus camaldulensis</i> Dehn. "plt"	5
M20	<i>Pinus pseudostrobus</i>	5
M24	<i>Quercus magnolifolia</i> Née. "nat"	5

Tabla 38. Clasificación de poder calorífico e inflamabilidad de especies forestales ("nat", natural y "plt" plantación).

De forma general para cada especie se realizó un redondeo de las cuatro estaciones evaluadas en el año 2005, con respecto a su poder calorífico e inflamabilidad, como se presenta en la Tabla 39.

Poder Calorífico		Inflamabilidad	
Especie	Clasificación	Especie	Clasificación
<i>Pinus oocarpa natural</i>	3	<i>Pinus oocarpa natural</i>	5
<i>Acacia pennatula natural</i>	3	<i>Acacia pennatula natural</i>	5
<i>Quercus resinosa nat</i>	2	<i>Quercus resinosa nat</i>	5
<i>Pinus oocarpa plant</i>	3	<i>Pinus oocarpa plant</i>	5
<i>Pinus douglasiana plt</i>	3	<i>Pinus douglasiana plt</i>	5
<i>Sustrato de P. douglasiana</i>	3	<i>Sustrato de P. douglasiana</i>	5
<i>Pinus devoniana plt</i>	4	<i>Pinus devoniana plt</i>	5
<i>Quercus resinosa</i>	2	<i>Quercus resinosa</i>	5
<i>Clethra rosei</i>	2	<i>Clethra rosei</i>	5
<i>Verbesina greenmanii</i>	2	<i>Verbesina greenmanii</i>	5
<i>Pinus pseudostrobus</i>	3	<i>Pinus pseudostrobus</i>	5
Sust P.pseud	3	Sust P.pseud	5
<i>Quercus magnolifolia</i>	1	<i>Quercus magnolifolia</i>	5

Tabla 39. Clasificación de las diferentes especies forestales estudiadas en función del poder calorífico y la inflamabilidad ("nat", natural y "plt" plantación).

De la información de las Tablas anteriores podemos establecer varias conclusiones específicas, pero sin dejar de considerar los otros parámetros que se analizaron para la determinación del riesgo de incendio.

Para el establecimiento de repoblaciones es y será muy adecuado para el futuro el plantar especies resistentes a los incendios forestales para preservar las áreas establecidas de degradaciones posteriores.

La barrera corta fuego o cortafuegos naturales, estarán compuestas de árboles resistentes a incendios para la preservación de áreas de importancia social o ecológica y no favorecer a la degradación o pérdida de superficies forestales ya establecidas.

La representante presente de la vegetación subtropical que encontramos en la Sierra de la Primavera es la *Acacia pénatela*. Esta especie es un indicador de áreas degradadas, por lo que posteriormente a un impacto ambiental (incendio, plagas, pastoreo intensivo) en la que se pierde arbolado, se provoca su rápida aparición o la presencia de esta especie, además que la misma se encuentra entre las especies con mayor poder calorífico de las evaluadas, con un nivel similar al de los pinos. Por lo anterior es necesario realizar un estudio químico de la fracción de los extractos, para establecer que compuesto y cuanto provocan su alta potencialidad calorimétrica y de inflamabilidad.

Basándonos en estudios anteriores, y especialmente en el realizado por Proupín en 1998, los altos valores caloríficos presentan inflamabilidades bajas con un sistema de autodefensa natural. En esta investigación la inflamabilidad presentó valores altos, pero a pesar de ello se ha encontrado que de las especies evaluadas como *Quercus resinosa* colectada en zona seca (M3) como en zona húmeda (M10) sí presentan diferencias entre ellas. Esto se puede observar en las Tablas 17 a la 19. Además se ha encontrada otra especie de este género con posibles características para futuras repoblaciones. Tales diferencias las mostramos en la Figura 37.

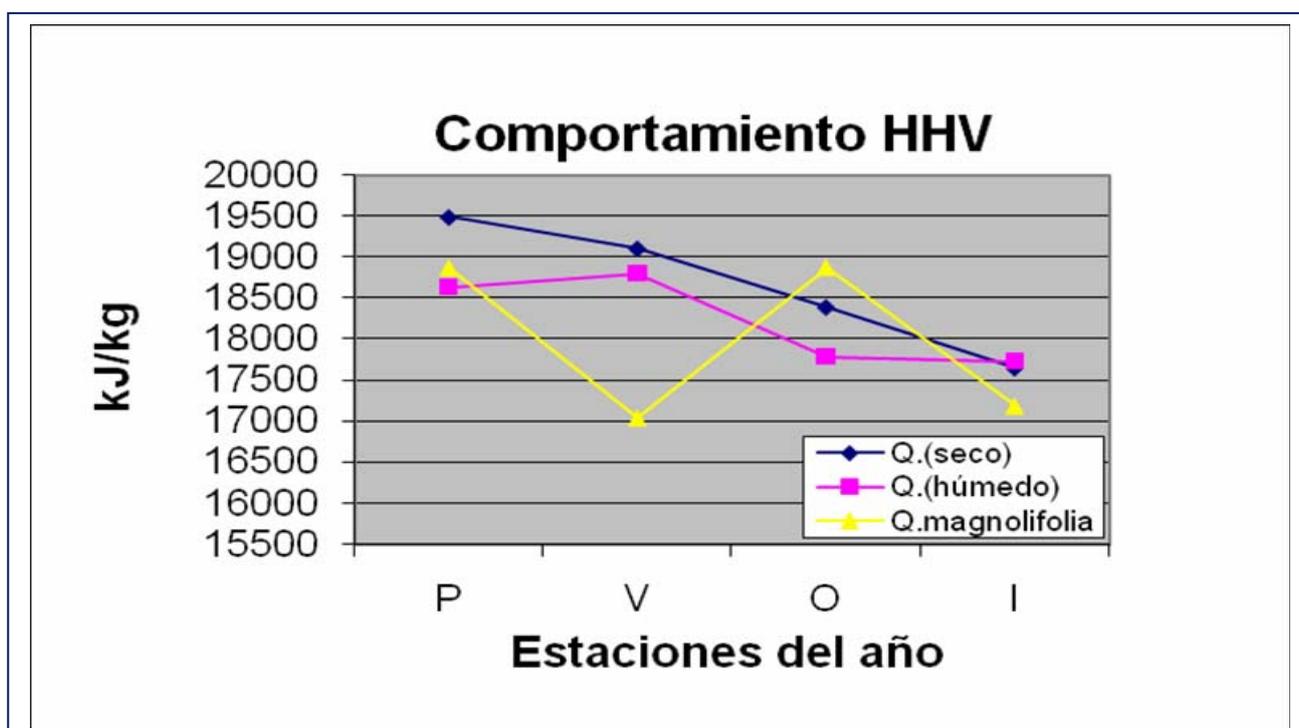


Figura 37. Comportamiento del poder calorífico superior ( $\text{kJ kg}^{-1}$ ) entre especies de *Quercus spp.*

Por el momento, de las especies evaluadas como son los pinos tanto de bosque natural como repoblaciones, son las que presentan en algunas estaciones altos valores, tal es el caso para *Quercus resinosa* en zona seca en la primavera presenta un poder calorífico alto. En cambio esta misma especie, pero localizada en zona húmeda, su mayor valor se presenta en verano, mientras que para el *Quercus magnolifolia* se presenta en otoño. Por lo que es posible utilizar estas especies como barrera corta fuego o cortafuegos naturales, pero estas deben tener varias plantaciones de agave en líneas tres bolillo, para que éstas repoblaciones corten el frente de propagación de incendios superficiales.

La elaboración de índices de riesgo se pueden considerar como el resultado más importante de la investigación, pero lamentablemente no se pudo realizar una buena separación en las imágenes de satélite utilizadas, Quick bird y Aster, ya que la primera de ellas de alta resolución presentó una serie de problemas al realizar la clasificación no supervisada y supervisada, además se probaron varios métodos como es clasificador de máxima probabilidad. Por lo que no pudimos realizar una excelente separación entre los tipos de vegetación, así como sus mezclas. En la actualidad se cuentan con algunos mapas realizados por estos procedimientos, pero es posible que algunos de los procesos no están bien revisados con demasiado detalle en campo, como es el proceso de verificación en campo, posterior a la clasificación de la imagen.

A pesar de ello ya se cuenta con la información de la potencialidad energética que presentan las especies forestales en la Sierra de la Primavera (Jalisco, México) con evaluaciones del 2003 al 2005, lo que con esta información generada se podrá aplicar como una herramienta preventiva contra los incendios forestales.

Además es posible la incorporación de nuevas variables como otras herramientas con la finalidad de perfeccionar el índice de riesgo. Entre las variables a considerar es incorporar sistemas de información geográfica, imágenes hiperespectrales que aún en México se comienzan a utilizar, estas imágenes por su gran cantidad de bandas podrían facilitar las separaciones de vegetación con una buena precisión, contar con información de las especies mediante radiómetros, un estudio detallado de la química de especies forestales en el que se incluya hojas, corteza y ramas. Y por último la modelación del comportamiento del fuego.

En la siguiente Tabla se muestran los índices de riesgo de las diferentes especies forestales en sus diferentes estaciones del año de la primera zona evaluada en México mediante esta metodología.

2005		HHV				Inflamabilidad				Índice de riesgo			
Muestra	Especie	P	V	O	I	P	V	O	I	P	V	O	I
M1	<i>Pinus oocarpa</i> natural	3	3	4	3	5	5	5	5	3	5	4	3
M2	<i>Acacia pennatula</i> natural	3	3	3	2	5	5	5	5	3	5	4	2
M3	<i>Quercus resinosa</i> natural	3	3	2	2	5	5	5	5	4	5	2	2
M4	<i>Pinus oocarpa</i> plantación	3	3	3	2	5	5	5	5	3	4	4	2
M5	<i>Pinus douglasiana</i> plantación	3	3	3	3	5	5	5	5	3	4	4	2
M5s	<i>Pinus douglasiana</i> sustrato	3	3	2	3	5	5	5	5	3	4	4	3
M6	<i>Pinus devoniana</i> plantación	4	4	3	3	5	5	5	5	4	4	4	2
M10	<i>Quercus resinosa</i> natural	2	2	2	2	5	5	5	5	3	4	4	2
M11	<i>Clethra rosei</i> natural	2	2	2	2	5	5	5	5	3	4	4	2
M14	<i>Verbesina greenmanii</i> natural	2	2	2	1	5	5	5	5	3	4	3	2
M20	<i>Pinus pseudostrobus</i>	3	3	3	3	5	5	5	5	3	5	4	2
M24	<i>Quercus magnolifolia</i> Née. "nat"	2	2	2	1	5	5	5	5	3	4	4	2

Tabla 40. Índices de Riesgo de especies forestales en la Sierra de la Primavera (Jalisco, México) ("nat", natural y "plt" plantación).

De acuerdo a los datos antes presentados existe información que debe destacarse como es:

La enorme dependencia de los índices de riesgo de las diferentes biomásas forestales tiene de los parámetros climáticos y de tipo atmosférico.

Los tipos de vegetación que se encuentran en la zona evaluada encontramos bosque de pino, bosque de encino, vegetación subtropical, vegetación acuática y subacuática y vegetación secundaria. Existe una fuerte mezcla entre la vegetación por lo que lo hace más difícil para los sistemas de riesgo, así como su combate.

Con lo referente a las condiciones climáticas de tres estaciones instaladas y una muy cercana a la zona evaluada, podemos determinar que no hay diferencias significativas entre las variaciones climáticas de las estaciones, por lo que son significativas de muy bajas y no mayores a 8 años.

Mediante el análisis factorial se determinó que las mismas especies presentan un comportamiento muy idéntico con respecto a su poder calorífico, por lo que no hay diferencias significativas, pero no así entre estaciones del año, por lo que cada una de estas especies presenta una característica muy especial de la localidad donde se encuentra y de alguna manera influirá en los índices de riesgo de cada zona.

El generar los índices de riesgo en los mapas contribuirá a que los responsables de la Sierra de la Primavera tengan herramientas para los programas preventivos y combate de incendios forestales, así como en manejo de combustible forestal mediante quemadas controladas, debido a que los combustibles ligeros pueden presentar una humedad del 5,85 %, lo que lo hace muy inflamable y presentan altos valores del poder calorífico, además esta información es una información valiosa para los programas de reforestaciones. Los márgenes razonables con que se cuentan es que más del 90 % de las causas de los incendios son de origen antrópico, prediciendo que existen algunas zonas que son menos susceptibles a este tipo de fenómenos, siempre y cuando ya no se deje perder superficie forestal en las periferias de la Sierra y principalmente en el interior de la sierra.

Con lo que se refiere a la composición química de las especies forestales es importante abordar más sobre este aspecto, ya que existe un único estudio de aceites de pino en la región y la cantidad de extractos son muy altos, ya que este valor se considera como promedio entre 3 y 4 %. Como se ha presentado las especies de México se encuentran muy por encima de otros promedios en el mundo del porcentaje de extracto que contienen.

De acuerdo al poder calorífico de las especies es posible aprovechar la biomasa forestal (combustible forestal) mediante la xiloenergía, que podría generar energía eléctrica, pero para ello debe realizarse una viabilidad de este estudio energético, ya que su recogida elevaría altos costos y aprovechamiento de esta energía que se libera en los incendios.

Deben realizarse programas de quemas controladas, debidos a que los combustibles ligeros forestales de pinos y pequeños relictos que quedan de eucaliptos presentan alto el poder calorífico, lo que pueden facilitar la ignición en los incendios forestales.

Es muy importante resaltar que este índice de riesgo debe ser dinámico, mediante la incorporación de nuevas variables y nuevas innovaciones tecnológicas en el manejo de los incendios forestales para que esta información no quede obsoleta a futuro. Por lo que las nuevas recomendaciones del Grupo de Investigación TERBIPROMAT de la Universidad de Santiago de Compostela puedan mejorar y perfeccionar este índice de riesgo.





**CONCLUSIONES**

## 6. CONCLUSIONES

Mediante una bomba calorimétrica Parr 1108 y en Epirradiador se realizaron las determinaciones del poder calorífico y ensayos de inflamabilidad para un total de 15 combustibles, de los cuáles se evaluaron al final 12 especies de gran importancia en los incendios forestales. La clasificación de estas especies se determinó principalmente en función de los parámetros termoquímicos antes mencionados, tal como se representa en la Tabla 38. Este tipo de clasificación es de aplicación en:

1. Generar mapas energéticos que contribuyan a valorar los recursos energéticos actuales de la biomasa forestal en la Sierra de la Primavera u otras regiones del país. este aprovechamiento xiloenergético sería transformado a energía eléctrica de una manera sostenible y racional. Por lo tanto estos mapas aportarían las posibles áreas factibles de ser aprovechadas y explotables energéticamente. Para ello será necesario el utilizar y desarrollar algoritmos en las clasificaciones de las imágenes de satélite, para poder obtener unos buenos resultados de caracterización de las diferentes formaciones forestales.
2. La evaluación de los parámetros biológicos y ambientales nos proporcionan las herramientas necesarias para aplicarse en los programas de reforestación mediante barrera corta fuego o cortafuegos naturales. En estas plantaciones no deberán establecerse formaciones monoespecíficas, especialmente de *Pinus* y *Acacia*. Por lo tanto es aconsejable establecer plantaciones con mezclas de especies con menores índices de riesgo. Así deberán seleccionarse especies poco agresivas para el medio y resistentes a futuros incendios, ya que esto deja muy en claro que en los últimos 20 años de reforestaciones en la Sierra de la Primavera se presentan pocas superficies establecidas o ya son inexistentes.
3. La aplicación de estos resultados pueden contribuir grandemente a los programas preventivos y combate de incendios forestales, lo que favorecería gestionar y dirigir mejor los recursos encaminados a la extinción de los incendios.
4. Continuar con la evolución del comportamiento de las diferentes especies a lo largo del año, tal como se muestra en la Figura 35, con lo que podremos realizar en caso necesario de ajustar el índice o agregar nuevos parámetros. Una de las ventajas de este índice es su dinamismo y flexibilidad.

El proceso generado a partir de los valores caloríficos e inflamabilidad de cada una de las especies de una manera individual, y en la que se determinaron los índices de riesgo para las diferentes masas forestales, se recoge en las Tablas 35 y 36 respectivamente. Este análisis es muy complejo y en él se analizan los parámetros químicos, biológicos y ambientales. Debemos tener en cuenta que solamente con la combinación de estos parámetros se pueden determinar adecuadamente los índices de riesgo reales. Este índice nos permitirá pronosticar el comportamiento del fuego en las masas forestales antes y durante el incendio forestal, por lo que con la información generada se podrá prevenirlos o en su caso combatirlos de una rápida extinción.

Estos índices de riesgo se plasman en forma de mapas para las diferentes masas forestales evaluadas. El gran problema actual es el carecer de un inventario forestal actualizado con una adecuada y actualizada separación de masas. Por lo tanto será necesario en un futuro inmediato la construcción de un mapa forestal actualizado.





**BIBLIOGRAFÍA**

## 7. BIBLIOGRAFÍA

### LIBROS/ARTÍCULOS

- Aguado, I.; Camila A. Fundamentos y utilización de índices meteorológico de peligro de incendio. Serie Geográfica. Vol. 7. pp. 49-58.
- Aguilar, R. N. 2004. Importancia, manejo y control de extraíbles e incrustaciones (pitch) en la fabricación de papel. Madera y bosques. No. 10:1. pp. 89-99.
- Aguilera, C. 1985. Flora y fauna mexicana. Mitología y tradiciones. Ed. Everest Mexicana. Médico, D.F. pp. 30.
- Alía, R; Galera, R.; Martín, S. 1999. Mejora Genética y masa productoras se semillas de los pinares españoles. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Instituto Nacional de Investigaciones y Tecnología Agraria y Alimentaria. pp. 237.
- Almaraz, A.N. 2000. Estudio quimiotaxonómico de *Pinus* Sección *Leiophyllae* (PINACEAE). Tesis de Doctorado en Ciencias Especialidad en Fisiología. Escuela Nacional de Ciencias Biológicas, Instituto Politécnico Nacional. México, D. F
- Anderson, H. E. 1982. Aids to Determining Fuel Model for Estimating Fire behavior. USDA Forest Service Ogden.
- Anónimo. 1928. Torres observatorio para descubrir incendios de bosques. Revista México Forestal VI (II).
- Anónimo. 1979. Miguel Ángel de Quevedo. Remembranzas de un Apóstol. Revista bosque y fauna 1: pp. 7-10.
- Arnaldos, V, J.; Navalón, N. X.; Pastor, F. E.; Planas, C. E.; Zárata, L. L. 2004. Manual de ingeniería para la prevención y extinción de incendios forestales. Ediciones Mundi Prensa. pp. 414.
- Asimov, I. 1982. Introducción a la Ciencia. Plaza y Janés. México. D.F. pp. 837.
- Barney, H. H.; G.R. Fahnestock; W.G. Herbolzheimer; R.K. Millar; C.B. Phillips and J. Pierovich. 1984. Fire Managment. In Weger, K.G. (ED). Forestry Handbook. John Wiley and Sons. New York. pp. 189-152.
- Birks, J. S. y Kanowski, P.J. 1988. Interpretation of the coniferous resin. *Silvae Genetica* 37: 29-39
- Browning, B. I. 1967. Methods od Wood chemistry. Vol. 1. Interscience Publishers. New Cork, pp. 689.
- Brown, J. K.; Oberheu, R. D. and Jhonston, C. M. 1982. Handbook for inventorying surface fuels and biomass in the interior west. USDA Forest Service. General Technical Report. INT-129
- Chuvieco S. E. 2002. Teledetección ambiental, la observación de la tierra desde el espacio. Ariel Ciencia. pp. 586.
- Chuvieco S. E. y Martín I. M. del Pilar. 2004. Nuevas tecnologías para la estimación de riesgo de incendios forestales. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Instituto de Economía y Geografía. Madrid, España. pp. 189.
- DeBano, L. F. 1991. Effect of fire on soil properties. Proccedings on management and productivity of western montane forest soil. USDA. Forest Service. General technical report. INT 288. Boise. I.D. p 151-156.
- Díaz, R. S. G. 2008. Aceites esenciales de *Pinus oocaroa* y *Pinus douglasiana* de la primavera Zapopan, Jalisco. México. Tesis para obtener el grado de Licenciado en Biología. Universidad de Guadalajara. pp. 47.
- Díaz Vera Adalberto. 2004. Influencia y afectación del Bosque La primavera al clima urbano de la zona metropolitana de Guadalajara. Tesis Maestría en Ciencias en Hidrometeorología con especialidad en Oceanografía y Meteorología Física. CUCEI. Universidad de Guadalajara.
- Donahue, J.K, 1995, Geographic variation in stem-xylem terpene chemistry in native populations of *Pinus greggi* Engelm. *Forest Genetics* 2(4):217-225 Raleigh N.C.
- DPCI. (Departamento de Prevención y Combate de Incendios). 1964. In. Subsecretaría Forestal y de la Fauna. Seis años de actividad forestal y de la fauna 1959 -1964. SFF. México. pp. 103 -136.
- Elvira, M- M., L; Hernando, Lara C. 1989. Inflamabilidad y energía de las especies de sotobosque. Instituto de Investigaciones Agrarias de España. pp. 99.
- Esquinca, R. O. 1950. El problema forestal de México en relación con el derecho agrario. Tesis profesional de Jurisprudencia. UNAM. México. D.F.
- FAO. 1981. El eucalipto en la repoblación forestal. Organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación. pp. 723.
- Farjon Aljos; Pérez de La Rosa J. y Styles Brian T. 1997. Guían de Campo de los pinos de México y América Central. Yhe Royal Botanic Gardens, Kew. Universidad de Oxford. pp. 130.
- Flores, G. J. G; Rosas, A. O. G; Ortega, M. A. T; Rodríguez, C. O. G. 2005. Observaciones al plan de quema y sugerencias a la norma 015. Resumen de la Memoria del VII Congreso Mexicano de Recursos Forestales.: 295- 296. Chihuahua, Chi.

- Gaitan, M. G. 1928. Los incendios de bosques. Revista México forestal. VI(II).
- Galeote, R.G. 1987. Evaluación del uso de equipo aéreo en el combate de incendios forestales en México. Seminario de titulación. DICIFO. UACH. Chapingo. 120 h
- García, E. S. Determinación de la actividad fungitóxica de los compuestos extraíbles de cuatro cortezas de coníferas, hacia los hongos xilófagos. Tesis Ingeniero Químico. Universidad de Guadalajara. pp. 126.
- García, L. V. 1987. El papel de la vigilancia forestal en la administración pública de los recursos silvícolas del país. Seminario de Titulación. DICIFO, UACH. Chapingo. 49 h.
- González V. L. M. 1986. Contribución al conocimiento del género *Quercus* (Fagaceae) en el estado de Jalisco. Colección Flora de Jalisco. Instituto de Botánica. Universidad de Guadalajara. pp. 240.
- Gutiérrez, P. A. 1989. Conservacionismo y Desarrollo del Recurso Forestal. Texto Guía Forestal. Trillas. México. pp. 41 -45 y 51 -59.
- Harvey, E. White. 1968. Física descriptiva. Edit. Reverte Mexicana, S.A. segunda edición. pp. 432.
- Hernández, A. J; Paz, R. J.L; Distancia, C. O.2005. Programa universitario de prevención y combate de incendios forestales en el área natural protegida "Bosque La primavera". Resumen de la Memoria del VII Congreso Mexicano de Recursos Forestales.: 283. Chihuahua, Chi.
- Hernando, L. C. 1989. Inflamabilidad y poder calorífico de especies de sotobosque (Zona centro, Levante y Andalucía). Tesis. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes.
- Howell, F. C. 1979. El hombre prehistórico. Colecciones de la naturaleza de Time-Life. México. D. F. pp. 200.
- Incendios Forestales en Chihuahua. Parte 1. 2007. Revisado 15 de enero del 2007. <http://www.estrucplan.com.ar/Producciones/entrega.asp?IdEntrega=1434>
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística Geográfica e Informática. 1989. Guía para la Interpretación de Cartografía Uso del suelo. pp. 46.
- Iñiguez Herrera Gloria. Rodríguez Rivas Antonio y Salas Barajas J. Guadalupe. 2001. Control Biológico de la conchuela del eucalipto *Glycaspis brimblecombei* Moore (Homoptera:Psylloidea) Plaga Exótica del eucalipto. Simposio Nacional sobre Parasitología Forestal. Centro de estudios Avanzados. Universidad Autónoma de Chiapas. pp. 14-16.
- Islas, O. E. 1992. Evaluación de cinco especies de pino para la producción de pulpas termomecánicas blanqueadas. Tesis de Maestría en Ciencias en Celulosa y Papel. Universidad de Guadalajara. pp. 141.
- Kleinhentz, M.; Jactel, H., and Menassieu, P. 1999. Terpene Attractant Candidates of *Dioryctria Sylvestrella* in Maritime Pine (*Pinus pinaster*) Oleoresin, Needles, Liber, and Headspace Samples. J. Chem. Ecol. 25: 2741-2756.
- Latta, R. G.; Linhart, Y. B.; Lundquist, L.; Snyder, M. A. 2000. Patterns of Monoterpene Variation Within Individual Trees in Pondera Pine. Journal Chemistry and Ecology 26 (6): 1341-1357.
- Langheheim, J.H.: W. H. Stubblebin & C.E. Foster. 1979. Effect of moisture stress on composition and yield in leaf resin of *Hymenaeae courbaril*. Biochem Sys. Ecol. 7: 21-28.
- Loreto, F.; Nascetti, P.; Graverini, A.; And Mannozi, M. 2000. Emission and content of monoterpenes in intact and wounded needles of the Mediterranean Pine, *Pinus pinea*. Functional Ecology 14: 589-595.
- Maki, M. Ishihara.; M. Tamura, M. 2004. Estimation of leaf water status to monitor the risk of forest fires by using remotely sensed data. Remote Sensing & Environment.90: 441-450.
- Mannien, A. M.; Vourienn, M.: and Holopainen, J. K. 1998 Variation in Growth, Chemical Defense, and Herbivore Resistance in Scot Pine Provenances. J. Chem. Ecol. 28: 211-228
- Martínez, M. 1992. Los Pinos Mexicanos. Tercera Edición. Ediciones Botas. pp. 361.
- Mirov, N. T. 1961. Composition of gum turpentine of pines. U.S.D.A. Tech. Bull 1239. 158 p.
- Mirov, N. T. 1967. The Genus *Pinus* Chemical Geography, pp. 505-519. The Roland Press Company. New York.
- Montero, S. N. 2000. Evaluación energética, por calorimetría de bomba, de residuos forestales de Eucalipto en Galicia. Tesis de Lic. en Ciencias Físicas. Universidad de Santiago de Compostela. España. pp.87
- Muñoz, R. C. A.; Núñez López Daniel. 2005. Desarrollo de un sistema para identificar el peligro de incendios forestales en tiempo real en el estado de Chihuahua. Memorias del VII Congreso Mexicano de Recursos Forestales. Póster pp. 474 -475. Chihuahua, México.
- Muñoz, R. C. A. (a); Núñez, L. D.; González, H. S. a. 2005. Análisis de los patrones de distribución espacial de incendios forestales en el estado de Chihuahua. Memorias del VII Congreso Mexicano de Recursos Forestales. Póster pp. 576 -577. Chihuahua, México.
- Moncayo, R.F. 1981. Relaciones de algunas cosas de los montes. Serie Premio Nacional Forestal. No. 2. SFF. SARH. México. D.F. pp. 220.

- Núñez, C. J. L. 1984. Estudios sobre los extractos de la corteza de *Pinus oocarpa* y *Pinus ponderosa*. Tesis Ingeniero Técnico Industrial. Universidad de Guadalajara. pp. 50.
- Núñez, L. D; Muñoz, R. C. A. 2005. Detección de áreas incendiadas y la valoración de pérdidas económicas y potenciales en Chihuahua, México. Resumen de memorias del VII Congreso Mexicano de Recursos Forestales. pp. 580-581. Chihuahua, México.
- Núñez, Regueira, L; Rodríguez, A. J. A; Proupín; C. J. 1999. Design of risk index maps as a tool prevent forest fire in the northern coast of Galicia (NW Spain). Bioresource Technology. 69. pp. 23 -33.
- Núñez, Regueira, L; Rodríguez, J. A.; Proupín, J; Mouríño, B. 1999 (a). Designo of forest biomass energetic maps as a tool to fight forest wildfires. Thermochimica acta 328. pp. 111-120.
- Núñez, Regueira L; Rodríguez, A. J. A; Proupín, C. J. 2000. Design of risk index maps as a tool to prevent forest FIRE. Continental High mountainous zone of Galicia (NW Spain). Bioresource Technology. 71. pp. 51-62.
- Núñez, Regueira. L; Rodríguez, A. J.A.; Proupín, C. J. 2000 (a). Design of risk index maps as a tool to prevent forest fires in the humid Atlantic zone of Galicia (NW Spain). Thermochimica acta. 349. pp. 103-119.
- Núñez, Regueira. L; Proupín, C. J.; Rodríguez, A. J. A.; 2000 (b). Design of risk index maps as a tool to prevent forest fires in the hill-side zone of Galicia (NW Spain). Bioresource Technology 73. pp. 123-131.
- Núñez, Regueira. L; Rodríguez, A. J. A; Proupín, C. J.; Núñez, F. O. 2001. Calculation of forest biomass indices as a tool to fight forest fire. Thermochimica acta 378. pp. 9-25.
- Núñez, Regueira; Rodríguez, A. J.A.; Proupín, C. J. Vilanova, D. A. 2002. Determination of risk indices corresponding to *eucalyptus* en Galicia using bomb calorimetry. Thermochimica acta. 394. pp. 267- 278.
- Núñez, Regueira, L; Rodríguez, A. J. A.; Proupín, C. J.; Vilanova; D. A.; Romero, G. A. 2002 (a). Using bomb calorimetry for detrimination of risk indices of wildfire originating from pine residues. Thermochimica acta 394. pp. 291-304.
- Perry, J. P., 1991. The Pines of Mexico and Central America. Timber Press Inc. Portland, Oregon.
- Phillips, M.A. and Croteau, R.B. 1999. Resin-based defenses in conifers. Trends Plants Sci. 4: 184-190
- Pompa, G. M; E. Treviño, G. 2005. Análisis de la cobertura visual de las torres de detección de incendios forestales en Chihuahua, México. Memorias del VII Congreso Mexicano de Recursos Forestales. pp. 430-439. Chihuahua, México.
- Proupín, Castiñeiras. J. 1998. Aplicación de la calorimetría para determinación de índice de riesgo de diferentes biomasa forestales para su contribución a la prevención y lucha contra incendios forestales. Tesis de Doctorado en Ciencia Físicas. Universidad de Santiago de Compostela. pp. 164.
- Quevedo, M.A. DE. 1928. Los incendios de nuestros bosques y la necesaria atención para prevenirlos. Revista México Forestal. VI (11)
- Quevedo, M.A. DE. 1928 a. La quema de pastos es la principal causa de incendios en nuestros bosques. Revista México Forestal. VI (12).
- Raffa, K. F. y A. A. Berryman. 1983. Physiological aspects of lodgepole pine wound response to a fungal symbiont of the mountain pine beetle , *Dendroctonus ponderoseae* (Coleoptera: Scolytidae). Canad. Entymol. 15: 723-734.
- Rentaría Anima Juan Bautista; Treviño Garza Eduardo Treviño; Nívar Chaidez José de Jesús; Quiñones Chávez Andrés; Aguirre Carderón Oscar Alberto y Cantú Silva Israel. Modelos espaciales de peligro de incendios forestales en Pueblo Nuevo, Durango. Memorias del VII Congreso Mexicano de Recursos Forestales. pp. 290-291. Chihuahua, México.
- Reyna, B. O. F. 2004. Árboles y arbustos del Bosque La Primavera. Universidad de Guadalajara, Comisión Nacional de la Biodiversidad. ISBN 970-27-0491-X. pp. 118.
- Rentaría Anima Juan Bautista; Treviño Garza Eduardo Treviño; Nívar Chaidez José de Jesús; Quiñones Chávez Andrés; Aguirre Carderón Oscar Alberto y Cantú Silva Israel. 2005. Modelos espaciales de peligro de incendios forestales en Pueblo Nuevo, Durango. Memorias del VII Congreso Mexicano de Recursos Forestales. pp. 290-291. Chihuahua, México.
- Roberts, D.R. 1970. Within-tree variation of monoterpene hydrocarbon composition of slash pine oleoresin Phytochemistry. 9: 809-815.
- Rockwood, D.L. 1973. Variation in monoterpene composition of two oleoresin systems of loblolly pine. Forest Sci. 19: 147-153.
- Rodríguez, C. A.; Reynoso, D. J. J. 1992. Inventario florístico del Bosque-Escuela, Sierra de la Primavera, municipio de Tala, Jalisco. México. Boletín IBUG. Vol. 1 No. 3, 137-166.
- Rodríguez, R A. 1998. Desarrollo de un sistema matemático en la elaboración de planes de manejo sostenible en la Sierra de La Primavera, Jalisco. México. Tesis de Maestría en Ciencias Forestales. Universidad Autónoma de Nuevo León. pp. 123.

- Rodríguez, R. A.; Huerta, C, M.; Arellano, S, L.; Ramírez, C. 2004. Control de plagas en el campo geotermoeléctrico Cerritos, Colorados, Jal. Reporte Final. Convenio Comisión Federal de Electricidad. ESPDIPG-CC-0204. pp. 50.
- Rodríguez, T. D. A. 1994. 24000 años de incendios forestales en México. México y sus bosques. Vol. XXII. No. 2-3. pp. 7- 26.
- Rothermel, R. C. 1972. How to predict the spread and intensity of forest and range fires. Ogden. UT. USDA. Forest Service.
- Rudloff, E. von. 1975. Volatile leaf oil analysis in chemosystematic studies of North America conifers. Biochem. Sys. Ecol. 2: 131-167.
- Sagan, C. 1982. Cosmos. Editorial Planeta. México. D.F. pp. 366.
- Sánchez, S. O. 1976. La flora del Valle de México. Editorial Herrero, S.A. Tercera Edición. pp. 519.
- Salido, S.; Altarejos, J.; Noguerras, M.; Sánchez, A.; Luque, P. 2004. Chemical Composition and Seasonal Variations of Spike Lavender Oil from Sothern Spain. Journal of Essential Oil Research. 19 (3): 206-210.
- Sandoval, O. A. 1979. Estudio Analítico de las sustancias extraíbles de cuatro especies del género *Quercus*. Tesis Ingeniero Químico. Universidad de Guadalajara. pp. 77.
- Santos, E. M. 1986. Optimización del tamaño de partícula de corteza de *Pinus leiophylla* para la obtención de extracto acuoso (taninos). Tesis de Químico Técnico Industrial. Universidad de Guadalajara. pp. 41.
- SEMARNAP/SAGAR-1997. Norma Oficial Mexicana NOM-015-SEMARNAP/SAGAR-1997. Que regula el usos del fuego en terrenos forestales y agropecuarios, y que establece las especificaciones, criterios y procedimientos para ordenar la participación social y de gobierno en la detección y combate de incendios forestales. pp. 18
- SEMARNAT. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2000. Programa de Manejo Área de Protección de Flora y Fauna La Primavera. México pp. 132.
- SEMARNAT Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (2001). Programa Nacional Forestal 2001-2006. pp. 118
- Simard, A. J. 1968. The moisture content of forest fuels- A review of the basic concepts. Ottawa, Ontario. Forest Fire Research Intitute: 47.
- Simoneit, B. R. 2005. Seminario Caracterización de mezclas orgánicas a partir de espectros por Cromatografía de Gases-Espectrometría de Masas. Universidad de Guadalajara. Guadalajara, Jalisco.
- Sjödin, K., Persson, M.; Borg-Karlson, A. K.; and Norin, T. 1996. Enantiomeric compositions of monoterpene hydrocarbons in different tissues of four individuals of *Pinus sylvestris*. Phytochemistry 41: 439-445.
- Sjödin, K.; Persson, M.; Fäldt, J.; Ekberg, I.; And Borg-Karlson A. K, 2000. Ocurrence and correlations of Monoterpenes hidrocarbon enantiomers in *Pinus sylvestris* and *Picea abies*. J. Chem. Ecol. 26: 1701-1720.
- Suarez, J. ; Castro, R.; Maseda, F. 1999. Evaluación del poder calorífico superior en biomasa. Investigación Agraria. Sistemas y Recursos Forestales. 8(1): 129-137.
- TAPPI, Technical association of the pulp and paper industries. 2000. TAPPI Test Methods 2000-2001. Atlanta GA, EUA,
- TAPPI T 204 cm-97 (Solvent Extractives of Wood and Pulp).
- Turtola, S.; Mannien A.; Rikala R., and Kainulainen P., 2003. Drought stress alters the concentration of wood terpenoids in Scots Pine and Norway Spruce Seedlings. J. Chem Ecol. Vol. 29: 1981-1995.
- UNE 23-729-90. Ensayos de reacción al fuego de los materials de construcción. Calibrado del radiador. Norma Española pp. 4.
- Vaillant, G. C. 1973. La civilización Azteca. FCE. México. D.F. pp. 317.
- Vazquez, Y. C. 1982. Deterioro ambiental. CECSA. CNEB. México. D.F. pp. 59.
- Vázquez, E.; B. J. Denore. 1999. FOMFIS, un sistema para la cartografía de combustibles forestales a partir de imágenes de alta resolución. Revista de Teledetección. No. 12 pp: 1 -5.
- Vélez, R. 1985. Aplicación de la predicción del peligro para la prevención de los incendios forestales. Estudios sobre prevención y efectos ecológicos de los incendios forestales. Madrid. ICONA. pp 15-19.
- Villaseñor, A. R. 1980. Desarrollo histórico del subsector forestal. Memorias: Aspectos económicos y sociales de la actividad forestal. Pub. Esp. 18. INF. México. D.F.
- Villavicencio, G., R. F. 1992. Implantación de sitios permanentes de investigación medio indispensable para la ordenación ecológica forestal del bosque escuela. Tesis de Ingeniero Agrónomo Forestal. pp. 84.
- Verduzco, G. J. 1959. La investigación forestal en México. Memoria. II. Convencional Nacional Forestal. México. D.F.

#### PÁGINAS WEB

- [www.rjalcala.com/fdc8.htm](http://www.rjalcala.com/fdc8.htm). Febrero16 2007. Real Jardín Botánico. Juan Carlos I. Universidad de Alcalá. Sección de Arboretum.
- <http://ine.gob.mx/ueajei/publicaciones/libros/379/flora33.html>. Abril 02 2007. Instituto de Ecología. México.





**XUNTA DE GALICIA**  
CONSELLERÍA DE EDUCACIÓN  
E ORDENACIÓN UNIVERSITARIA

