



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

INSTITUTO DE GEOLOGÍA

DETERMINACIÓN DE PELIGRO A INCENDIOS
FORESTALES EN EL MUNICIPIO DE SANTA
MARÍA YAVESÍA, OAXACA, MÉXICO

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE
MAESTRO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS
(**BIOLOGÍA AMBIENTAL**)

P R E S E N T A

JULIO CÉSAR WONG GONZÁLEZ

TUTORA PRINCIPAL DE TESIS: DRA. ROSA IRMA TREJO VÁZQUEZ

COMITÉ TUTOR: DRA. MARÍA DE LOURDES VILLERS RUIZ
DR. DIEGO RAFAEL PÉREZ SALICRUP

MÉXICO, D.F.

Agosto, 2011



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Dr. Isidro Ávila Martínez
Director General de Administración Escolar, UNAM
Presente

Me permito informar a usted que en la reunión ordinaria del Comité Académico del Posgrado en Ciencias Biológicas, celebrada el día 23 de noviembre de 2009, se aprobó el siguiente jurado para el examen de grado de **MAESTRO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS (BIOLOGÍA AMBIENTAL)** del alumno **WONG GONZÁLEZ JULIO CÉSAR** con número de cuenta **9740419-6** con la tesis titulada **"DETERMINACIÓN DE PELIGRO A INCENDIOS FORESTALES EN EL MUNICIPIO DE SANTA MARÍA YAVESÍA, OAXACA, MÉXICO"**, realizada bajo la dirección de la **DRA. ROSA IRMA TREJO VÁZQUEZ**:

Presidente: Dra. María del Consuelo Bonfil Sanders
Vocal: M. en C. Irene Pisanty Baruch
Secretario: Dra. Rosa Irma Trejo Vázquez
Suplente: Dra. Ma. de Lourdes Villers Ruíz
Suplente: Dr. Diego Rafael Pérez Salicrup

Sin otro particular, me es grato enviarle un cordial saludo.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria, D.F., a 4 de agosto de 2011.

M. del Coro Arizmendi
Dra. María del Coro Arizmendi Arriaga
COORDINADORA DEL PROGRAMA

c.c.p. Expediente del interesado

AGRADECIMIENTOS

- Agradezco al Posgrado en Ciencias Biológicas de la UNAM, por todo el apoyo brindado durante los estudios de la maestría.
- Se agradece la beca otorgada por la Comisión Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT).
- Se agradece el apoyo recibido por parte del Proyecto de Investigación PAPIIT IN 227308-2 “Contribución a la construcción de alternativas dirigidas a la conservación de los bosques de la Cuenca alta del río Papaloapan, Oaxaca, México”.

Un amplio y sincero agradecimiento a los miembros del Comité Tutoral integrado por:

Dra. Rosa Irma Trejo Vázquez

Dra. María de Lourdes Villers Ruiz

Dr. Diego Rafael Pérez Salicrup

AGRADECIMIENTOS PERSONALES

A la Dra. Irma Trejo que me brindo su confianza y total apoyo durante la maestría. Por sus conocimientos compartidos y por ayudarme en todos los muestreos de campo.

A la Dra. Lourdes Villers que me ha motivado siempre a seguir adelante y confiar en mí desde la licenciatura.

Al Dr. Diego Salicrup por su valioso aporte de conocimientos en este estudio y por haberme recibido en Morelia para trabajar con mis datos y por formar parte de mi comité.

A la Dra. Consuelo y a la M. en C. Irene Pisanty por haber revisado con lujo de detalle el escrito y por no cobrarme todas las correcciones de estilo. Muchas gracias por sus recomendaciones, sabios comentarios y por formar parte del jurado.

Al próximo M. en C. Jorge Morfin, por ayudarme a resolver muchas dudas sobre la metodología y cálculo de los combustibles y demás detalles de la tesis.

A las autoridades del municipio de Santa María Yavesía, por permitirnos realizar este estudio y por toda su colaboración durante nuestra estancia. A la población de Yavesía por darnos permiso de acceder a sus bosques y que espero este trabajo les pueda servir de apoyo para continuar conservándolos como hasta ahora, con esa unidad que los caracteriza.

Agradezco a la familia Cruz, a Mauro, Laura, Raquel y Sara quienes nos recibieron y compartieron su hogar y amistad. A Martin, Damián, Lalo, Alma, Sr. Casiano, Sr. Lino, por brindarnos su apoyo y amistad.

A la unidad de ambientes controlados de la Facultad de Ciencias. A la Bióloga Laura Patricia Olgúin Santos por facilitar el uso de las cámaras de ambientes controlados para el secado de la hojarasca.

Muchas gracias a todas las personas que me ayudaron en mi arduo y extenso trabajo de campo soportando largas caminatas, lluvia, frío y calor. A mi tutora Irma Trejo, Adriana Albuerne, Alejandra Aguilar, Circe, Cecilia Mendoza, Edgar Orta, Evelyn Piña, Fabiola Rojas, Gabriela González, Eduardo Cruz, Laura Bonilla, Paulina Arias, Pedro Montes, Raquel Cruz, Tania Velázquez, Verónica Aguilar y Yoli Medina.

DEDICATORIA

Para ti Mamá, muchas gracias por acompañarme siempre en todo momento, por esas largas desveladas en las que me hiciste compañía mientras escribía este documento que con mucho cariño te dedico.

A mis queridos hermanos Moisés, Enrique, Argelia, Elías y Omar dedico este trabajo.

Siempre con alegría a mis sobrinos Abril, Verónica, Jorge, Fernanda y Miguelin.

A mi diantre de chaparra abuela linda, que a pesar de que ya se te va el patín, te sigo queriendo mucho y con cariño te dedico esta tesis. Tu nieto Julio Wong, por si se te llega a olvidar. ¡Gracias cariño!

Con afecto a TODA mi familia, quienes siempre me han motivado para seguir adelante en mis estudios.

¡Nuevamente va con mucho cariño a TODOS-TODOS mis amigos!

JW

ÍNDICE

RESUMEN	i
ABSTRACT	iii
I. INTRODUCCIÓN	1
II. ANTECEDENTES.....	3
III. OBJETIVOS	9
IV. ÁREA DE ESTUDIO	10
4.1. Localización.....	10
4.2. Hidrología	11
4.3. Clima.....	11
4.4. Vegetación	11
4.5. Aprovechamiento del bosque	12
4.6. Problemática ambiental	12
V. MÉTODO.....	14
5.1. Sitios de muestreo.....	14
5.2. Estructura de la vegetación	15
5.3. Evaluación de combustibles.....	17
5.4. Relación superficie/volumen de combustibles	21
5.5. Distribución espacial de combustibles	21
5.6. Análisis de datos topográficos y meteorológicos	22
5.7. Análisis estadístico	23
5.8. Evaluación del Peligro de incendios	23
VI. RESULTADOS	25
6.1. Estructura de la vegetación	25
6.2. Valor de Importancia Relativa	29
6.3. Estructura vertical y diamétrica	30
6.4. Carga de combustibles.....	31
6.5. Relación superficie/volumen de combustibles	35
6.6. Mapa de combustibles forestales	36
6.7. Características topográficas.....	37
6.8. Condiciones atmosféricas	38

6.9. Peligro de incendios	43
VII. DISCUSIÓN.....	45
VIII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	56
IX. LITERATURA CITADA	58
Anexo 1. Valor de importancia relativa por especie en los sitios de muestreo.	63

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Tamaño y tiempo de retardo para combustibles muertos.	4
Cuadro 2. Clases de intervalos estructurales.	16
Cuadro 3. Fórmulas para el cálculo de carga de combustibles muertos.	18
Cuadro 4. Índices de peligro potencial de incendio para material leñoso muerto.	23
Cuadro 5. Características del estrato arbóreo.	25
Cuadro 6. Estructura vertical por intervalos de clase.	30
Cuadro 7. Estructura diamétrica por intervalos de clase.	31
Cuadro 8. Carga de combustibles muertos leñosos y no leñosos expresado en $Mg\ ha^{-1}$	32
Cuadro 9. Valores obtenidos por medio de Kruscal-Wallis. Carga de combustibles.	33
Cuadro 10. Principal combustible y su dispersión.	34
Cuadro 11. Características topográficas.	38
Cuadro 12. Valores obtenidos por medio de Kruscal-Wallis. Humedad y temperatura.	40
Cuadro 13. Condiciones atmosféricas y topográficas.	40
Cuadro 14. Grados de Peligro de incendios en el municipio de Yavesía.	43
Cuadro 15. Comparación de carga de combustibles en $Mg\ ha^{-1}$	53

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización general del área de estudio.	10
Figura 2. Localización de los sitios de muestreo.	14
Figura 3. Características de un sitio de muestreo.	15
Figura 4. Muestreo de combustibles leñosos y no leñosos.	17
Figura 5. Área basal relativa de las principales especies.....	26
Figura 6. Densidad relativa de las principales especies.	27
Figura 7. Frecuencia relativa de las principales especies.....	28
Figura 8. Dominancia relativa de las principales especies.	29
Figura 9. Carga de combustibles totales por comunidad vegetal.	33
Figura 10. Relación superficie/volumen por clase diamétrica.....	35
Figura 11. Distribución de la carga de combustibles en el municipio de Yavesía.	37
Figura 12. Temperatura y humedad relativa media mensual.....	39
Figura 13. Temperatura y humedad relativa promedio por hora. Abril y mayo.....	42

RESUMEN

Se estima que en México ocurren en promedio 6774 incendios forestales cada año, de los cuales el 60% suceden en áreas con cobertura arbórea, por lo que es importante estudiar los incendios y así establecer medidas adecuadas para su prevención y combate. En el municipio de Santa María Yavesía, Oaxaca, se planteó el objetivo de identificar las zonas con un mayor grado de peligro de incendios, basándose principalmente en el análisis de la carga de combustibles forestales. Se establecieron diez sitios de estudio, distribuidos en el área y en las principales comunidades vegetales dominadas por especies de *Quercus*, *Abies* y *Pinus*. En cada sitio se determinó la estructura de la vegetación y se calculó la carga de combustibles forestales muertos, para lo cual se aplicó la técnica de intersecciones lineales, ampliamente utilizada en los estudios sobre incendios. En cada sitio se evaluaron las condiciones topográficas y atmosféricas (temperatura y humedad relativa). Para obtener una visión espacial de los combustibles, se elaboró un mapa que muestra la distribución potencial de las distintas cargas. El peligro de incendios se determinó considerando las categorías establecidas en la literatura como bajo, moderado, alto, muy alto y extremo. Existe una amplia heterogeneidad en la estructura de los bosques de Yavesía lo cual implica diferentes cargas y tipos de combustibles. El bosque de *Pinus-Quercus* que presenta la mayor extensión en el municipio, registró la máxima cantidad de combustibles con 164.2 Mg ha^{-1} . De acuerdo con la distribución de los combustibles, la mayor parte de la superficie forestal de Yavesía presenta un grado de peligro extremo; no obstante la carga fue muy variable incluso dentro del mismo tipo de vegetación, lo cual se atribuye no sólo a la estructura de la vegetación, sino también a las características del relieve. Los valores más bajos de carga corresponden al bosque de *Pinus hartwegii* con un aporte de 17.2 Mg ha^{-1} y corresponde al menor peligro de incendio. Los sitios 1, 2, 8, 9 y 10 tuvieron un grado de peligro bajo, y en los dos últimos las bajas temperaturas y elevados porcentajes de humedad hacen poco probable que ocurra un incendio. El sitio 5 de *Pinus-Quercus* se clasificó con peligro moderado, mientras que en el mismo tipo de vegetación los sitios 3, 6 y 7 así como el 4 de *Quercus-Pinus* alcanzaron la categoría de extremo peligro. En estos últimos se deben emprender

actividades de monitoreo continuo, así como distintas labores de manejo de combustibles con la finalidad de evitar incendios de gran intensidad.

Palabras clave: incendios forestales, carga de combustibles forestales, peligro de incendios, estructura de la vegetación.

ABSTRACT

Is considered that in Mexico occur 6774 forest fires on the average every year, of which 60% occur in areas to arboreal covering, of here the importance to study the fires and this way to establish appropriate measures for prevention and control. The municipality of Santa María Yavesía in the state of Oaxaca, is distinguished for a strict conservation of their forests as well as for the control of fires, for that the accumulation of fuels could make vulnerable to these forests to a fire forest of big dimensions. For the above mentioned, was carried the objective to identify the areas with a greater grade of forest fire danger, based mainly on the forest fuel load. Ten sample studies they were established, distributed in the municipality and in the main communities of *Quercus*, *Abies* and *Pinus* and their associations. In each sample study the structure of the vegetation was determined and the load of dead forest fuels was assessed, applying the technique of lineal intersections, broadly used in the studies of forest fires. In each sample study the topographical and weather were evaluated, considering mainly the temperature and relative humidity. To obtain a space vision of the fuels, a map was elaborated that shows the potential distribution of the different loads. The forest fire danger was determined considering the categories established in the literature as low, moderate, high, very high and extreme. A wide heterogeneity exists in the structure of the forests of Yavesía that which implies different loads and type of fuels. The forest of *Pinus-Quercus* registered the maximum fuels loads with 164.2 Mg ha^{-1} , and it is the community that presents the greater extension in the municipality. In accordance with the distribution of the fuels, most of the forest surface of Yavesía presents a grade of forest fire danger low and extreme; nevertheless the load was very variable even inside the same type of vegetation, that which is attributed not only to the structure of the vegetation, but also to the topographical characteristics of the place. The lowest values in fuel load correspond to the forest of *Pinus hartwegii* with a contribution of 17.2 Mg ha^{-1} , considering this sample study with smaller forest fire danger. The sample plots 1, 2, 8, 9 and 10 had a grade of danger low, and in both last the conditions of low temperature and high percentage of relative humidity make not very probable that happens a fire. Only in the sample study 5 of *Pinus-Quercus*, the danger corresponded to a moderate type, while in the same type

of vegetation the sample studies 3, 6 and 7 as well as the 4 of *Quercus-Pinus* presented an extreme grade of danger. In these communities is necessary the activities of observation continuous, as well as different works of management of fuels with the purpose to avoid forest fires of great intensity.

Key words: forest fires, forest fuels load, forest fire danger, structures of the vegetation.

I. INTRODUCCIÓN

Los incendios forestales son uno de los principales procesos de perturbación en ecosistemas forestales, no obstante existen ecosistemas que dependen del fuego para mantener sus especies, sus hábitats y sus paisajes; es decir ecosistemas dependientes del fuego. En contraste, hay otras áreas en las que el fuego puede llevar a la destrucción o a la pérdida de especies y de hábitats nativos, estas áreas se conocen como ecosistemas sensibles al fuego (Myers, 2006). El fuego como elemento natural es un factor que ha contribuido a la selección de especies, la composición de formaciones vegetales y la estabilidad o sucesión de sus etapas (Ruiz, 2000). Por ejemplo, ciertas especies de los géneros *Cistus*, *Eucalyptus* o *Pinus* sólo germinan eficazmente tras el paso del fuego. En otro aspecto, los incendios pueden afectar a nivel individual de la planta o afectar a la comunidad y al paisaje, no obstante algunas especies de coníferas han desarrollado diferentes mecanismos como el grosor de la corteza para resistir ó sobrevivir a los incendios (Agee, 1993).

Un incendio forestal se define como la propagación del fuego no controlado sobre la vegetación forestal (Rodríguez, 1996). Se conocen tres tipos de incendios: los superficiales, en los que el fuego consume combustibles como plantas herbáceas, arbustos y hojarasca; los subterráneos, en los cuales el fuego quema raíces y la materia orgánica bajo la superficie del suelo, y los incendios de copa en los que el fuego se propaga a través de la copa de los árboles y son caracterizados como los más severos (Arno y Allison, 2002). Los incendios superficiales son los más comunes en México, aunque la sequía registrada en verano de 1997 y la falta de lluvias en el invierno 1997-98 provocaron que la vegetación se incendiara en la primavera de 1998 favoreciendo los tres tipos de incendios lo cual afectó una superficie de 849, 632 hectáreas en todo el país (Magaña, 1999). En México la presencia de incendios se debe en gran medida al factor humano, asociado principalmente a las actividades agropecuarias (CONAFOR, 2009).

La ocurrencia y el comportamiento de los incendios forestales están gobernados principalmente por factores como el tiempo atmosférico, la topografía del lugar y los combustibles forestales (DeBano, 1998). Entre los atributos más importantes de los combustibles se encuentran la cantidad o carga, el tamaño y forma, la distribución o arreglo

horizontal y vertical sobre la superficie, el contenido de sustancias químicas, la densidad de la madera y el contenido de humedad que presentan (Porrero, 2001; Wong, 2005). Los distintos tipos de vegetación implican diferentes cargas y tipos de combustibles (Vélez, 2000) por lo que es importante evaluar la composición y estructura de las comunidades, es decir, las especies que las conforman y el arreglo que éstas toman en el espacio (Benítez, 2006). Tanto los combustibles vivos como los muertos, así como la capa de fermentación y hojarasca, están muy influenciados por la estructura de la vegetación.

Considerando las características de los combustibles forestales así como las condiciones atmosféricas, se han desarrollado diversos sistemas de evaluación de riesgo y peligro de incendios, con el objetivo de evaluar los factores condicionantes de la ocurrencia, el comportamiento y los efectos del fuego (Dentoni y Muñoz, 2007).

En años recientes en México se han obtenido avances en la prevención y combate de incendios, sin embargo no han sido suficientes, debido a que en el país faltan metodologías que permitan evaluar y hacer predicciones sobre el comportamiento del fuego (Miranda, 2004). Los materiales combustibles influyen directamente en el comportamiento del fuego, por lo que constituyen una variable de gran importancia para definir el peligro de incendios (Bautista, *et al.*, 2005). La carga y distribución espacial de los combustibles, su relación superficie/volumen, así como la topografía y las condiciones climáticas, son quizá los factores primordiales en la probabilidad de que se inicie un incendio y en su comportamiento una vez producido por lo que resulta de gran importancia considerarlos en las investigaciones, prevención, control y combate de incendios así como en su modelado espacial.

El municipio de Santa María Yavesía, Oaxaca, se distingue por una estricta conservación de sus bosques así como por el control de incendios. Asimismo, se han realizado en el área de estudio actividades de saneamiento forestal generando una variación en la carga de combustibles. Por lo anterior, la acumulación de combustibles podría hacer vulnerables a estos bosques a un incendio de grandes dimensiones, por lo que se propone establecer medidas de prevención y conocer como está constituida la carga de combustibles.

II. ANTECEDENTES

A nivel mundial, se estimó que durante el año 2000 la superficie afectada por los incendios forestales abarcó cerca de 350 millones de hectáreas, ocasionando la pérdida de vidas humanas, vegetación, vida silvestre y un gran daño económico en términos de los recursos destruidos (FAO, 2006). Como una forma de estudiar la complejidad de los incendios, se han desarrollado múltiples sistemas de evaluación del riesgo y peligro; entre los más importantes se encuentran: el sistema de evaluación de peligro canadiense, Canadian Forest Fire Danger Rating System (CFFDRS), en los Estados Unidos se tiene el National Fire Danger Rating System (NFDRS) y The International Fire Information Network (FIRENET) en Australia (Dentoni y Muñoz, 2007). En México, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y el Ministerio de Recursos Naturales de Canadá ofrecen los primeros avances del sistema de información de los incendios forestales, el cual presenta la información base y los resultados de una metodología para establecer índices que pueden ayudar a detectar sitios con alto riesgo de incendio. En la actualidad, la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) se encarga de regular las actividades referentes a la prevención y combate de incendios (CONAFOR, 2009).

En los incendios forestales, para que el fuego se produzca se requiere de tres elementos clave: el combustible forestal, una fuente de calor y el oxígeno, que conforman el llamado “triángulo del fuego” (Agee, 1993). Los combustibles forestales están conformados por todo material vegetal que se pueda inflamar y se pueden dividir en vivos y muertos; y éstos últimos por el diámetro que presentan en; a) delgados o finos (hojas y ramillas finas), b) medianos (ramillas y ramas) y c) gruesos (ramas gruesas y troncos), también conocidos como material leñoso de árboles y arbustos que han caído y que se encuentran en o sobre la superficie del suelo (Rodríguez, *et al.*, 2002; Estrada y Ángeles, 2007). El material ligero u hojarasca, así como la capa de fermentación comprende aquellos materiales que se acumulan por caída natural de los diferentes estratos vegetales, y sus principales componentes son hojas y humus (Estrada y Ángeles, 2007). Por otra parte, la topografía del terreno facilitará o dificultará la acumulación de combustibles según sea el caso y esto lleva a considerar la existencia de una relación entre las características topográficas y la distribución de los combustibles (Villers, 2004).

Otra manera de clasificar a los combustibles es por el tiempo de retardo que presentan (Fosberg, 1977) esto es, el tiempo que tardan en perder o ganar aproximadamente el 66% de la diferencia entre el contenido de su humedad inicial y su equilibrio con la humedad relativa del aire a una cierta temperatura establecida (**Cuadro 1**). El tiempo de retardo es considerado como un método empírico para medir los efectos entre el tamaño del combustible, es decir la relación superficie/volumen y su exposición con el ambiente (Simard, 1968).

Cuadro 1. Tamaño y tiempo de retardo para combustibles muertos.

Diámetro*	Tiempo de retardo	Tipo de combustible
Menor a 0.6 cm	1 hora	hojas, ramillas finas
De 0.6 a 2.5 cm	10 horas	Ramillas
De 2.6 a 7.5 cm	100 horas	Ramas
Mayor a 7.5 cm	1000 horas	ramas gruesas, troncos

Fuente: Fosberg, 1977; Rodríguez, *et al.*, 2002.

*Originalmente el diámetro de los combustibles se estableció en medidas inglesas, aquí se expone el correspondiente en el sistema métrico.

La carga de combustibles forestales se refiere al peso que tienen por unidad de superficie del terreno y se expresa generalmente en toneladas por hectárea (ton ha^{-1}) o en mega gramos por hectárea (Mg ha^{-1})¹. La carga de los combustibles vivos (árboles principalmente) se puede estimar por medio de la biomasa, que relaciona el peso con las dimensiones de cada individuo (Nájera y Hernández, 2007). No obstante, debido a la densidad de la madera (masa por unidad de volumen) el contenido de humedad de los combustibles y su peso puede variar, ya que sufre cambios volumétricos con el secado y el volumen disminuye (Robles y Echenique, 1983) lo cual puede afectar la carga del combustible. A partir de contenidos de humedad iguales, la madera densa, como la de *Quercus* tarda más en arder pero lo hace con mayor intensidad que maderas menos densas, como la de muchos pinos que arden con mayor facilidad, lo que se atribuye también a su resina. La densidad también afecta la capacidad calorífica, es decir el poder de la madera para absorber o ceder calor sin variar su temperatura (Porrero, 2001). La gravedad

¹ $1 \text{ ton ha}^{-1} = 1 \text{ Mg ha}^{-1}$

específica o densidad de la madera es por tanto un índice de importancia para estimar la carga de combustibles forestales.

En cuanto a los elementos del tiempo atmosférico más importantes en los incendios forestales se encuentran la precipitación, la humedad relativa, la temperatura, la velocidad y dirección del viento, así como la radiación solar. Estas variables, en conjunto con los combustibles y la topografía, determinarán en gran medida la inflamabilidad de los combustibles, así como el posible comportamiento del fuego y su combate (Bessie y Johnson, 1995). Conforme el día avanza la temperatura asciende y la humedad relativa desciende progresivamente lo que da como resultado una pérdida en el contenido de humedad de los combustibles, con lo que incrementa la probabilidad de incendios. Se ha descrito que una humedad relativa del 40% es comúnmente el valor que representa el punto de peligro de incendio, sin embargo la humedad puede variar durante el día y de un lugar a otro (García y García, 1987). En ambientes secos la humedad relativa puede llegar a alcanzar niveles de 20% o inclusive menos.

Rodríguez (1996) especifica que el peligro de incendios forestales se refiere a la existencia de condiciones ambientales y de los combustibles favorables para el inicio y desarrollo de un incendio, tales como temperatura elevada, humedad relativa baja, sequía, vientos veloces, pastos y desechos de explotación secos, carga y distribución de combustibles, entre otros. El riesgo por su parte, corresponde a la existencia de factores que pueden iniciar el fuego, tales como quemas agrícolas en terrenos adyacentes a bosques, hornos de carbón, cazadores, maquinaria, fogatas, líneas eléctricas, entre otros.

Los diversos modelos del comportamiento de los incendios utilizan como insumos diferentes mapas de información como los de elevación, exposición, pendiente, combustibles superficiales y cobertura del dosel, para la predicción de la expansión del fuego principalmente en incendios superficiales. Aunque la mayoría de estos mapas pueden obtenerse con relativa facilidad, el desarrollo del mapa de combustibles requiere de mucho mayor esfuerzo y análisis. Más aún, la caracterización de combustibles y su distribución espacial son factores críticos para simular el comportamiento del fuego (Flores y Omi, 2003). Por otro lado, Garnica y Omi (2002) establecen que para simular el comportamiento de los incendios es necesario elaborar mapas

confiables acerca de los modelos de combustibles, no obstante el mapeo de la distribución de los combustibles aplicando técnicas de geomática es uno de los retos más difíciles en el campo de los incendios.

Los estudios sobre incendios en México se han realizado con distintos enfoques que contemplan tres aspectos: a) los estudios sobre el efecto del fuego en las comunidades vegetales, b) las actividades de combate de incendios y prevención en las que intervienen labores para disminuir tanto el peligro como el riesgo de incendios, y c) el uso del fuego como herramienta silvícola (Villers y López, 2004). El inventario de combustibles forestales es una de las herramientas principales en la investigación de los incendios. La técnica más utilizada en este contexto es la de intersecciones lineales propuesta por Brown (1974) que consiste en el conteo de las intersecciones de las piezas leñosas en muestreos verticales sobre una línea. Entre las primeras investigaciones que aplicaron ésta técnica se encuentra la de Rodríguez y Sierra (1995), quienes realizaron el primer inventario de combustibles forestales en bosques del Distrito Federal. Asimismo Bautista *et al.* (2005) efectuaron un inventario de combustibles leñosos en el ejido Pueblo Nuevo, Durango, utilizando la técnica de intersecciones. Bautista y colaboradores especificaron que las mayores concentraciones de combustibles se ubicaron en las zonas donde se llevaron a cabo tratamientos de cortas de regeneración y aclareos, y en áreas con mayor productividad en pendientes moderadas. En 2007 Nájera y Hernández aplicaron la metodología de Brown (*op. cit.*) para estimar la carga de combustibles en el estado de Durango. Aplicando la técnica de intersecciones lineales, los autores determinaron la cantidad suficiente de líneas para obtener resultados precisos sin sobreestimar la carga de combustibles. Establecieron que 25 líneas (de 20 m cada una) por hectárea en bosques de *Pinus sp.* es el número idóneo para inventariar la carga de combustibles. En el Parque Nacional El Chico, en el estado de Hidalgo, Estrada y Ángeles (2007) realizaron una investigación que evaluó la carga de combustibles muertos en comunidades de *Quercus*, *Pinus*, *Juniperus* y *Abies*, en la cual hallaron que el mayor peso de combustibles se ubica en el bosque de *Abies religiosa*. El material no leñoso se ubica también en *Abies religiosa*; sin embargo, el mayor espesor de este material se encontró en el bosque de *Pinus sp.*

Definir las situaciones de peligro de incendios ha sido una de las tareas complejas para los especialistas del fuego. En el trabajo realizado por Zapata (1990) se establecieron ciertos indicadores de peligro potencial de incendios forestales con base en la cuantificación del material combustible. Durante su muestreo en Durango, este autor concluyó que la acumulación de combustibles derivados de aprovechamientos forestales representa un alto peligro de incendio y propuso cinco grados de peligro (bajo, moderado, alto, muy alto y extremo). Por otra parte, Rojo *et al.* (2001) desarrollaron un modelo estadístico de regresión lineal utilizando la velocidad de propagación, temperatura y humedad para tablillas de madera de *Pinus montezumae* y *P. patula* y generaron una tabla definiendo cinco grados de peligro de incendio (nulo, bajo, moderado, alto y extremo). Los índices de peligro se pueden dividir en dos grupos: índices de inflamabilidad e índices de propagación. Los primeros miden la ocurrencia de incendios, es decir, si existen condiciones favorables de combustión, mientras que en los segundos se añade el comportamiento del fuego después de iniciado, es decir se incorporan las condiciones de propagación (Magaña, 1983).

Por otra parte, Garnica y Omi (2002) mapearon los combustibles forestales y especificaron que para simular el comportamiento de los incendios es necesario elaborar mapas confiables de éstos. Lograron obtener resultados con un 74.9% de confiabilidad en el mapeo. Por otra parte, Miranda (2004) desarrolló un programa de incendios forestales del parque ecológico Chipinque en Nuevo León, con base en un sistema de información geográfica. Determinó un índice de riesgo de incendios y lo delimitó en un mapa a partir de capas de infraestructura de operación del parque y combate de incendios. Asimismo evaluó la carga de total combustibles por clase diamétrica obteniendo niveles de riesgo bajo en la mayor parte del parque.

Villers y López (2004), evaluaron la cantidad de combustibles por unidad de área y el riesgo de incendios en el parque nacional Malinche en Tlaxcala, por medio de fotointerpretación y trabajo de campo. Como resultado, encontraron que el riesgo es mayor en los bosques de *Pinus* por su cercanía a las zonas agrícolas donde se realizan quemas, sin embargo la cantidad de combustibles es muy baja. En el bosque de *Abies*, la peligrosidad es menor debido a la difícil accesibilidad a los pobladores, no obstante tienen una mayor cantidad de combustibles y por lo tanto mayor riesgo de un incendio severo. Usando parámetros físicos, como pendiente de la

ladera, orientación de la ladera, forma del perfil longitudinal y transversal de la ladera, Villers (2004) realizó un trabajo en el que se plantean algunos modelos lineales generalizados con el objetivo de aplicarlos a la predicción de materiales combustibles. Esta autora concluye que el método es útil y permite construir modelos predictivos para algunos atributos de los combustibles, como profundidad y peso del mantillo y las cantidades por clase diamétrica tomando como base principal los parámetros físicos.

III. OBJETIVOS

General

- Determinar las características de los combustibles forestales que constituyen el grado de peligro de incendios en el municipio de Santa María Yavesía, Oaxaca.

Particulares

- Describir la estructura de las principales comunidades vegetales.
- Evaluar la carga y la relación superficie/volumen de los combustibles forestales muertos (hojarasca, capa de fermentación, ramas y troncos sobre el suelo).
- Elaborar un mapa de carga de combustibles.
- Analizar las condiciones topográficas y atmosféricas del área de estudio.
- Identificar las zonas con mayor peligro de incendios.

IV. ÁREA DE ESTUDIO

4.1. Localización

El trabajo se desarrolló en el municipio de Santa María Yavesía en el distrito de Ixtlán, ubicado en la sierra de Juárez en la región centro norte del estado de Oaxaca ($17^{\circ}08'30''$ y $17^{\circ}15'45''$ latitud norte y $96^{\circ}21'15''$ y $96^{\circ}27'45''$ longitud oeste). Colinda al norte con el municipio de Santiago Xiacui, al sur con Villa Díaz Ordaz, al este con Santiago Laxopa y al oeste con San Miguel Amatlán (Ramírez *et al.*, 2001). Presenta un gradiente altitudinal que va de los 1900 hasta los 3280 m s.n.m. con pendientes desde 16° hasta 45° . El municipio cuenta con una superficie territorial de 6,455 ha y sus bosques se han mantenido sin manejo forestal desde hace más de 60 años (Figura 1).

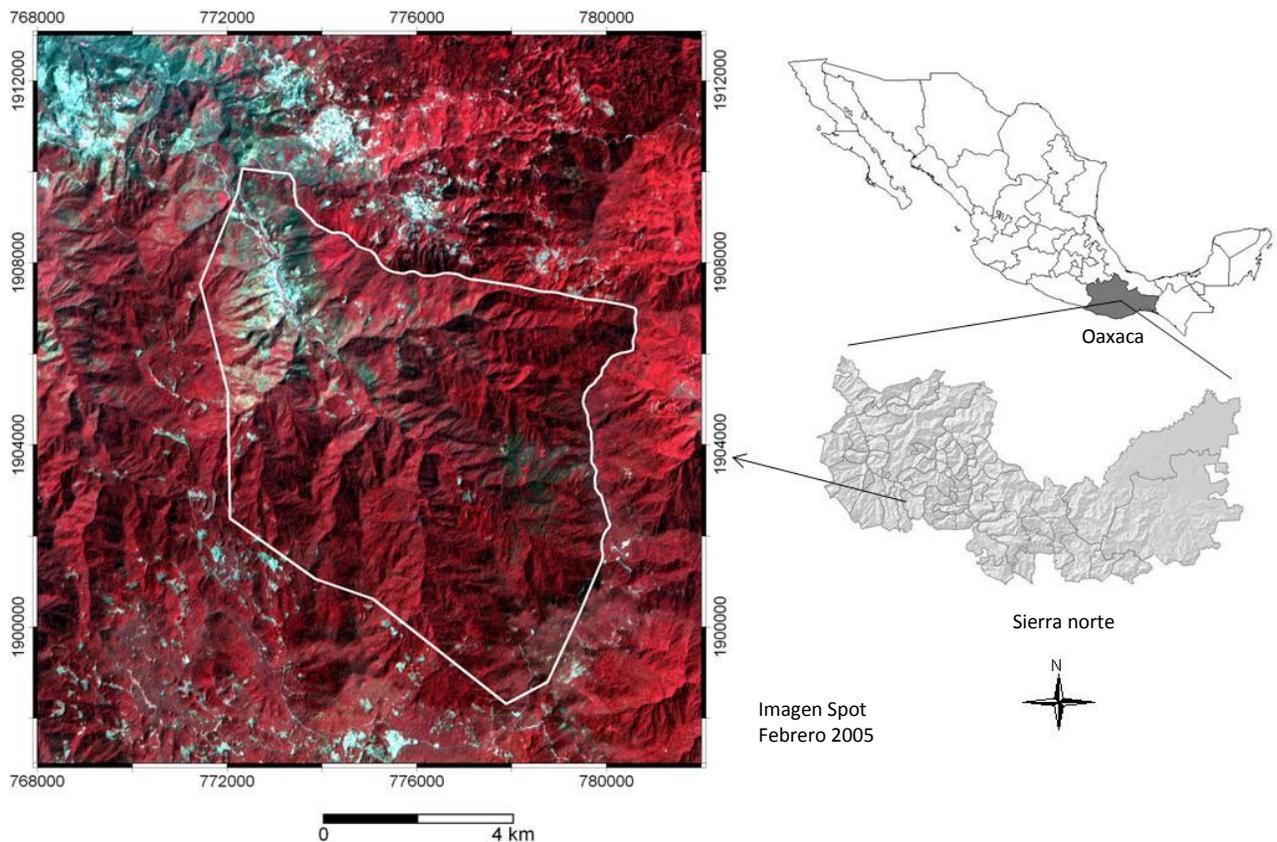


Figura 1. Localización general del área de estudio.

4.2. Hidrología

El territorio de Yavesía es de gran importancia ya que ahí se encuentra el nacimiento del brazo más largo del Río Papaloapan, y es parte de la cabecera de una de las importantes cuencas en el estado de Oaxaca. Los principales ríos que existen en la región son Las Guacamayas, Cara de León, Los Trabajos y Yavesía (Ramírez *et al.*, 2001).

4.3. Clima

De acuerdo al sistema de clasificación de Köppen modificado por García (1988), en la parte baja del municipio el clima es templado con verano fresco largo, subhúmedo con régimen de lluvias en verano C(w₂)(w)igw, una temperatura media anual de 16.8° C y una precipitación media anual de 1029 mm. En la parte más alta de la cuenca el clima es semifrío subhúmedo con verano fresco largo, con régimen de lluvias en verano Cb'(w₂)(w)ig con una temperatura promedio anual de 9.8° C y una precipitación media anual de 1084 mm (Benítez, 2006; Aguilar, 2007).

4.4. Vegetación

De acuerdo con Ramírez *et al.* (2001), Aguilar (2007) y Trejo (2009) en el municipio de Yavesía están presentes el bosque de *Quercus-Pinus* con un porcentaje aproximado de 12.8% de la superficie total, el bosque de *Quercus* con 2.6%, el bosque de *Pinus-Quercus* con 55.9%, el bosque de *Abies* con 2.4% y el bosque de *Pinus hartwegii* con 4.1%. En menor porcentaje se pueden encontrar áreas cubiertas por matorral (0.2%) y las zonas agrícolas (1.8%). La mayor parte de los bosques dominados por pinos son rodales coetáneos, maduros (50-80 años), probablemente surgidos después de incendios.

Los bosques mixtos de *Pinus-Quercus* ocupan la mayor parte del territorio y están representados por *Pinus patula*, *P. pseudostrobus*, *P. oaxacana*, *P. montezumae*, *P. ayacahuite*, *P. teocote* y *P. lawsonii*. Asimismo, existe una gran variedad de especies del género *Quercus*,

tales como *Q. laurina*, *Q. macrophylla*, *Q. acutifolia*, *Q. rugosa* y *Q. castanea*. En las partes medias y bajas del municipio se localizan los bosques mixtos de *Quercus-Pinus*, mientras que en las zonas más altas se encuentran los bosques de *Pinus hartwegii*, *P. ayacahuite* y *Abies hickelii* estos últimos distribuidos principalmente en las cañadas (Aguilar, 2007).

4.5. Aprovechamiento del bosque

Los pobladores de Yavesía realizan labores de caza y recolecta dentro de sus bosques. La cacería es practicada de manera regular entre los habitantes y los animales preferidos son ardilla, mapache, venado, armadillo, comadreja y la zorra. Por otro lado, la mayor parte de la población sigue utilizando leña (además de gas) recolectada de lugares cercanos a la comunidad o en terrenos de cultivo. Las especies más utilizadas son el encino (4 a 5 especies), manzanita (*Arctostaphylos pungens*), madroño (*Arbutus xalapensis*) y algunas especies de pino. La especie preferida es el encino, ya que es más durable y hace una mejor brasa. También se extrae madera que es trabajada por los carpinteros de la zona (Ramírez *et al.*, 2001).

4.6. Problemática ambiental

Desde el año 2004 los bosques de Yavesía se han visto afectados por distintas plagas, sobre todo *Dendroctonus adjunctus* Blandford 1897, coleóptero que ataca a diversas especies del género *Pinus*, como *P. arizonica*, *P. ayacahuite*, *P. herrerae*, *P. lawsonii*, *P. montezumae*, *P. patula*, *P. pseudostrobus*, *P. ponderosa*, *P. rudis* y *P. hartwegii* entre otros, localizados sobre los 2800 m s.n.m. Éste escarabajo, comúnmente llamado “gusano descortezador”, perfora la corteza externa y el floema del árbol. Las hembras son portadoras de hongos del género *Ophiostoma*, que contribuye de manera importante a la muerte del árbol (Cibrián *et al.*, 1995 citado en Camacho, 2008). Para combatir la plaga de *D. adjunctus*, los pobladores de Yavesía han utilizado el método de derribo y abandono, que tiene la ventaja de ser económico y no presentar efectos ecológicos negativos como contaminación o fuegos accidentales (Camacho, 2008). Sin embargo,

en ciertas áreas donde se ha efectuado este método se ha percibido una acumulación de restos de madera, combustible potencial para la ocurrencia de incendios.

V. MÉTODO

5.1. Sitios de muestreo

La ubicación de los sitios de muestreo para realizar los inventarios de vegetación y combustibles fueron propuestos tratando de que estuvieran representadas las principales comunidades vegetales, dominadas por bosques de *Quercus*, *Pinus* y *Abies*, representativas de la mayor parte de la superficie del municipio. En total se establecieron 10 sitios distribuidos en diferentes altitudes y tipos de comunidad, cuatro sitios en comunidades de *Pinus-Quercus*, dos sitios en *Quercus-Pinus*, y un sitio por cada comunidad de *Quercus*, *Pinus-Quercus-Abies*, *Abies hickelii* y *Pinus hartwegii* (Figura 2). El sitio *Pinus-Quercus-Abies* es resultado de la composición entre el bosque de oyamel y de coníferas, con algunas especies de encino en este último.

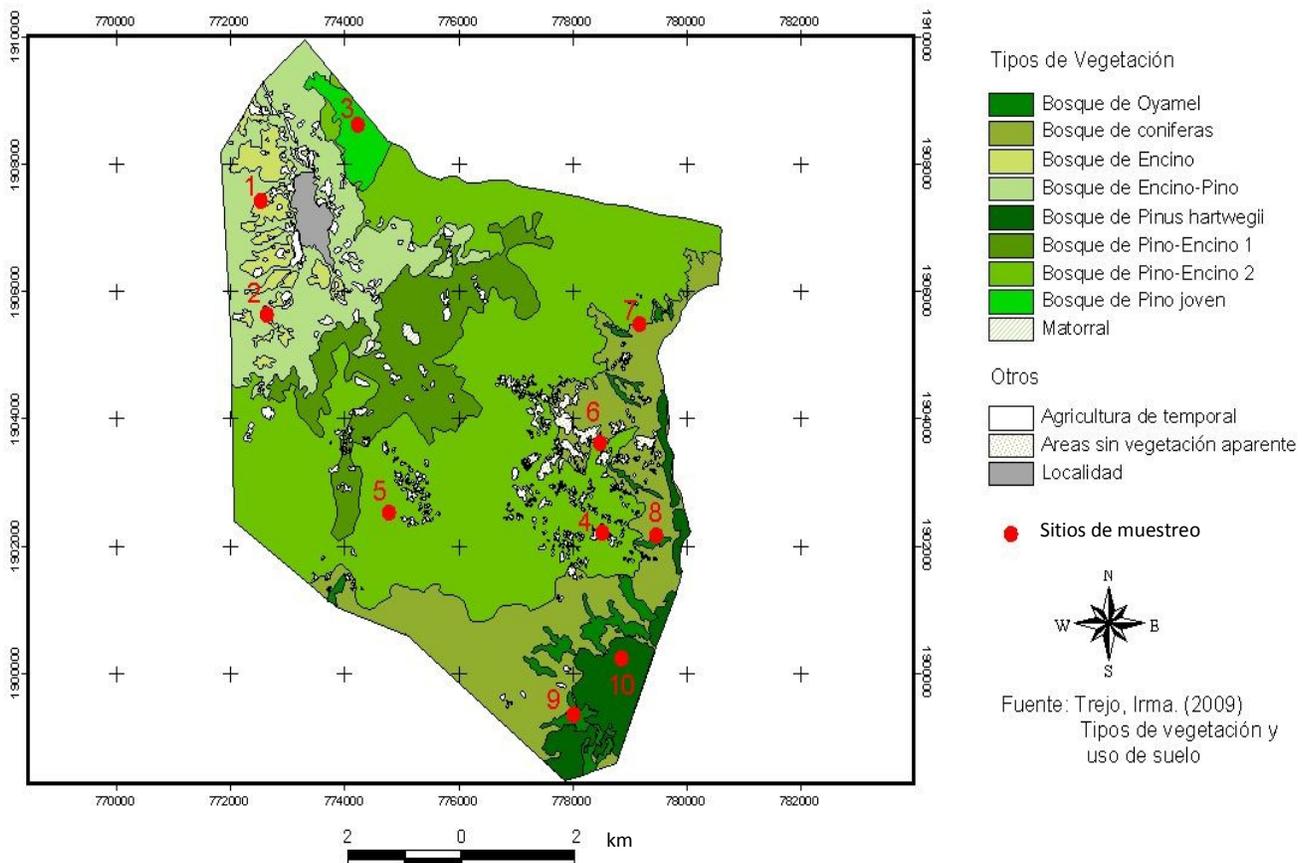


Figura 2. Localización de los sitios de muestreo.

Cada sitio consistió en una superficie de una hectárea dividida en diez círculos con un radio de 17.8 m y una distancia de 50 m entre el centro de cada círculo. Asimismo se establecieron tres líneas de 25 m separadas en un ángulo de 120° (Figura 3).

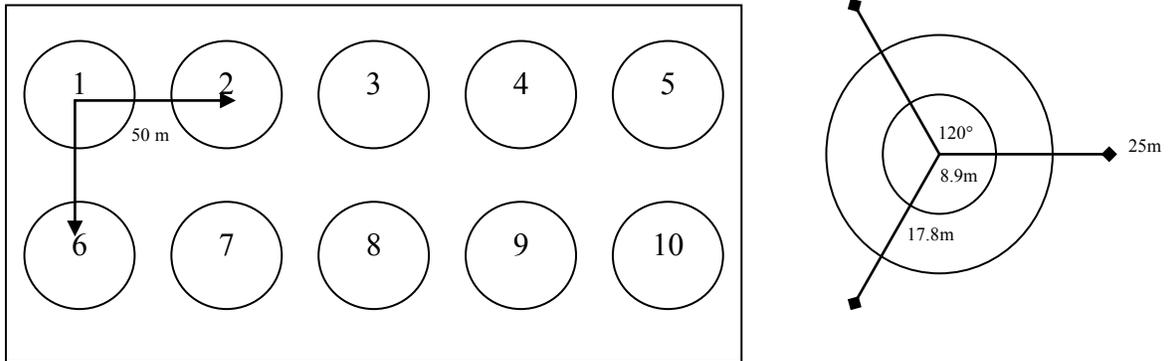


Figura 3. Características de un sitio de muestreo.

5.2. Estructura de la vegetación

Para evaluar la estructura de la vegetación se estableció un círculo menor con un radio de 8.9 m dentro de otro que es el principal de 17.8 m. En él se contabilizaron todos los árboles y arbustos con un diámetro a la altura del pecho (DAP tomado a una altura de 1.3 m) ≥ 1 cm, mientras que en el círculo grande se midieron únicamente los árboles a partir de un DAP ≥ 10 cm. En ambos círculos se midieron la altura y el diámetro de todos los individuos dentro de los rangos señalados tratando de identificarlos a nivel de especie. Los individuos que no se identificaron en el campo fueron colectados para su posterior determinación. Para calcular el área basal y el valor de importancia relativa (VIR) se aplicaron las siguientes fórmulas (BOLFOR *et al.*, 2000):

$$\text{Área basal} = \pi (D^2/4)$$

Donde:

D = DAP

$\pi = 3.141592$

Posteriormente, el área basal relativa (ABR) se obtuvo tomando en cuenta el área basal de cada especie y dividiéndola entre la suma total del área basal de todas las especies, como se muestra a continuación:

$$ABR = \frac{\text{Área basal de una especie}}{\Sigma \text{ del área basal de todas las especies}} \times 100$$

El valor de importancia relativa (VIR) de todas las especies presentes en cada sitio se determinó tomando en cuenta la densidad, frecuencia y dominancia relativas. El VIR se describe de la siguiente manera:

$$VIR = DR + FR + DmR$$

Donde:

$$DR = \text{densidad relativa} = \frac{\text{Número de individuos de una especie}}{\Sigma \text{ de todos los individuos de todas las especies}} \times 100$$

$$FR = \text{frecuencia relativa} = \frac{\text{Frecuencia de la especie}}{\Sigma \text{ de las frecuencias de todas las especies}} \times 100$$

$$DmR = \text{dominancia relativa} = \frac{\text{Área basal de una especie}}{\Sigma \text{ de las áreas basales de todas las especies}} \times 100$$

El análisis de la estructura vertical (altura) y diamétrica de las especies arbóreas de cada sitio se llevó a cabo considerando las seis clases de intervalos para ambos parámetros establecidas por Aguilar (2007) que se muestran en el cuadro 2.

Cuadro 2. Clases de intervalos estructurales.

Diámetro (cm)	1 - 2.5	2.6 - 5	5.1 - 10	10.1 - 30	30.1 - 50	> 50
Altura (m)	1.3 - 3	3.1 - 5	5.1 - 10	10.1 - 20	20.1 - 30	> 30

Fuente: Aguilar, 2007.

5.3. Evaluación de combustibles

Para obtener la carga de las diferentes clases de combustibles muertos sobre el suelo, se adecuó la técnica de intersecciones lineales propuesta por Brown (1974); Sánchez y Zerecero (1983). Dicha técnica consiste en el conteo de las intersecciones de las piezas leñosas en planos de muestreo verticales, para lo cual en cada círculo de 0.1 ha⁻¹ se ubicaron tres líneas de 25 m separadas en un ángulo de 120° teniendo un total de 30 líneas por sitio. Los combustibles se clasifican según su diámetro en cuatro categorías (cuadro 3). Un aspecto de la técnica es que las piezas menores a 7.5 cm de diámetro son simplemente contabilizadas en cada clase mientras que las mayores a 7.5 cm son medidas por su diámetro. Sin embargo para tener un análisis más detallado, en este estudio se midió el diámetro de todos los combustibles que se encontraban por debajo de la línea y se clasificaron en menores a 0.6 cm, de 0.6 a 2.5 cm, de 2.6 a 7.5 cm, y mayores a 7.5 cm. En los primeros 23 m de la línea se midieron aquellos combustibles a partir de 2.6 cm y hasta mayores de 7.5 cm, mientras que en los dos últimos metros se midieron todos los combustibles (Figura 4). Todas las mediciones se realizaron en cada línea.

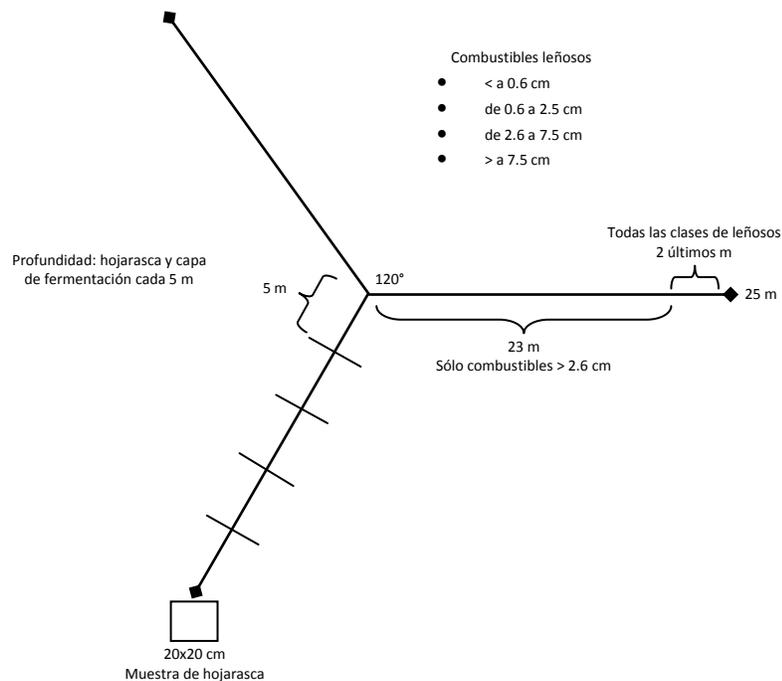


Figura 4. Muestreo de combustibles leñosos y no leñosos.

De acuerdo con Sánchez y Zerecero (*op. cit.*) se describen a continuación algunas de las reglas prácticas más importantes para el inventario de combustibles:

1. La medición de los combustibles debe comprender el material leñoso muerto (ramillas, tallos, ramas o tocones) de árboles y arbustos que haya caído a la superficie del suelo y que se ha separado de la fuente original de crecimiento.
2. Se consideran las ramas o ramillas que estén dentro o sobre la capa de hojarasca. No serán medidas si la ramilla se encuentra dentro de la capa de humus.
3. Si el plano de muestreo intersecta la parte final de una troza, esta sólo se medirá si el plano de muestreo cruza el eje central de la misma.
4. Si el plano de muestreo intersecta más de una vez una pieza curvada, se medirá cada intersección.
5. Si se encuentran astillas y trozas después de un aprovechamiento, se deben registrar sus diámetros.
6. Se deben medir los tocones enraizados o no, que no estén cubiertos por tierra, para lo cual se considera a los tocones no fijos como troncos de árboles o raíces individuales, dependiendo de donde son interceptados por la línea de muestreo. No se miden tocones sin alteración.

Para realizar el cálculo correspondiente de la carga de cada clase de combustibles expresada en mega gramos por hectárea ($Mg\ ha^{-1}$) se aplicaron las fórmulas del cuadro 3.

Cuadro 3. Fórmulas para el cálculo de carga de combustibles muertos.

Clase por diámetro	Fórmula
Menor a 0.6 cm	$P = \frac{(K \times \sum d^2)}{L} \times (0.49 * x c)$
De 0.6 a 2.5 cm	$P = \frac{(K \times \sum d^2)}{L} \times (0.46 * x c)$
De 2.6 a 7.5 cm	$P = \frac{(K \times \sum d^2)}{L} \times (0.44 * x c)$
Mayor a 7.5 cm	$P = \frac{(K \times \sum d^2)}{L} \times (0.41 * x c)$

Fuente: Modificado de Brown, 1974; Brown et al., 1982; Sánchez y Zerecero, 1983; Estrada y Ángeles, 2007.

Donde:

P = peso de combustibles expresado en Mg ha⁻¹

K = 1.234 constante para el cálculo de biomasa (Van Wagner, 1982)

Σd² = suma de los diámetros cuadrados

* = gravedad específica por clase (Brown, 1974; Ryan y Pickford, 1978; Sackett, 1980; Navarrete, 2006)

c = factor de corrección de la pendiente

L = tamaño de la línea de muestreo en cm

Cabe señalar que las modificaciones en las fórmulas anteriores consistieron principalmente en dos aspectos: en primer lugar para las clases menores a 7.5 cm se cambió el número de piezas interceptadas por la sumatoria de los cuadrados del diámetro, ya que como se mencionó anteriormente, se registraron los diámetros de todas las clases de combustibles. En segundo término la gravedad específica utilizada corresponde a valores reportados en la literatura que se ajustan al tipo de combustibles y vegetación del área de estudio.

Para ajustar los valores de la pendiente sobre una base horizontal se aplicó el factor de corrección de la pendiente de acuerdo con Brown (1974), con la siguiente fórmula:

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

La carga del material no leñoso, es decir la hojarasca y capa de fermentación, se calculó a partir de la profundidad y la densidad aparente de ambas capas. Para ello se midió la profundidad de cada capa con una regla de metal cada cinco metros sobre la línea de 25 m, tratando siempre de no alterar el estado de ambas capas (ver figura 4). El cálculo se realizó a partir de la siguiente fórmula:

$$CH = P \times DA$$

$$CF = P \times DA$$

Donde:

CH = carga de hojarasca en Mg ha⁻¹ cm⁻¹

CF = carga de fermentación en $\text{Mg ha}^{-1} \text{cm}^{-1}$

P = profundidad de la capa

DA = densidad aparente

Para obtener el valor de la densidad aparente, en el caso de la hojarasca se colectó una muestra con la ayuda de un cuadro de metal de 20x20 cm colocado al final de cada línea de muestreo, es decir a los 25 m (ver figura 4) con un total de 30 muestras por sitio. Las muestras fueron colocadas en bolsas de papel y trasladadas al laboratorio, donde fueron secadas a una temperatura de 42° C para obtener su peso seco. El volumen de cada muestra se obtuvo a partir del promedio de las profundidades y la superficie del cuadro; y una vez obtenido el peso seco y el volumen se calculó la densidad con la siguiente fórmula:

$$DA = (PS / V) \times 100$$

Donde:

DA = densidad aparente en $\text{Mg ha}^{-1} \text{cm}^{-1}$

PS = peso seco en g

V = volumen de hojarasca en cm^3

Debido a que no se colectaron muestras de la capa de fermentación para su procesamiento en laboratorio y obtención de densidad aparente para calcular su carga, se utilizaron los valores de densidad reportados en el trabajo de Alvarado *et al.* (2008). En dicho trabajo se reporta la densidad aparente tanto de la capa de fermentación de coníferas así como de latifoliadas en bosques templados del norte de la Sierra Madre Oriental. El valor de la densidad se obtuvo a partir de los sitios establecidos por Alvarado *et al.*, que presentaran una mayor afinidad en composición y estructura a los sitios de este trabajo, para lo cual se determinó el VIR. La densidad se obtuvo de la especie más representativa por sitio, sin embargo en la mayoría de los casos se determinó promediando los valores de dos tipos de bosque.

5.4. Relación superficie/volumen de combustibles

Ya que otros aspectos importantes que caracterizan a los combustibles forestales son su tamaño y forma, es decir la relación superficie/volumen, se realizó una colecta de 20 combustibles por clase en cada círculo de los sitios registrando el diámetro y la longitud de cada pieza de combustible. La relación se obtuvo por medio de la siguiente fórmula:

$$\frac{S = 2 \pi r h + 2 \pi r^2}{V = \pi r^2 l} \times 100$$

Donde:

S = superficie

V = volumen

$\pi = 3.1416$

r = radio

l = longitud

La dispersión, es decir la forma en que se encuentran los combustibles sobre la superficie de cada sitio de estudio, se definió de manera visual en cada círculo en tres tipos de categorías: uniforme, aleatoria y/o agregada.

5.5. Distribución espacial de combustibles

Para representar la distribución de la carga de combustibles total (leñosos y no leñosos) en el área de estudio, se elaboró un mapa tomando como referencia base una imagen satelital Spot 5² del municipio de Yavesía tomada en el año 2005. Dicha imagen está compuesta por tres bandas multiespectrales: B1 (verde), B2 (rojo) y B3 (infrarrojo cercano), todas con una resolución de 10 m (Spotimage, 2009). El procesamiento de la imagen se realizó con el programa de información geográfica IDRISI Andes versión 15.00.

² Satélite espacial número 5.

La distribución espacial de los combustibles se analizó por medio de una clasificación de máxima verosimilitud (MAXLIKE) que asigna todos los píxeles de la imagen a diferentes clases de cargas. Para hacerlo se digitalizó el polígono o campo de entrenamiento de cada sitio de estudio, correspondiente a la hectárea representativa de carga total de combustibles por sitio. Una vez obtenidos los campos de entrenamiento se procedió a la clasificación, que consiste en comparar el valor de cada píxel en las tres bandas y asignarlo a la clase de carga a la cual sea más parecida. Ya que durante el proceso de la clasificación puede ocurrir que pequeños grupos de píxeles no sean clasificados correctamente, se realizó un proceso de post-clasificación, que consistió en aplicar un filtro de tipo moda con un tamaño de kernel de 3x3 con la finalidad de una mejor clasificación.

5.6. Análisis de datos topográficos y meteorológicos

El parámetro físico pendiente se obtuvo por medio de un clisímetro estándar en forma de grados, que posteriormente se convirtió en porcentaje para realizar el factor de corrección de la pendiente. La orientación de cada sitio se determinó con una brújula tipo Brunton y los sitios se clasificaron en las principales orientaciones (N, S, E, W, NE, SE, SW y NW). La superficie del terreno se determinó de forma general en: cóncava, convexa y/o plana.

Con la finalidad de conocer las condiciones atmosféricas del área de estudio y su importancia en el grado de peligro, se analizaron los datos de dos estaciones meteorológicas automáticas modelo Vantage-Pro Davis® que se encuentran en la parte baja y alta del municipio de Yavesía. Asimismo, se utilizó la información registrada por siete sensores atmosféricos tipo Hobo® Pro Data Loggers, que registran las condiciones de temperatura y humedad por hora, los cuales se localizan uno en cada sitio de muestreo y colocados a una distancia de 30 cm sobre el suelo. Las principales variables analizadas fueron la temperatura y la humedad relativa calculando los valores promedio y también se obtuvieron los valores máximos y mínimos mensuales.

5.7. Análisis estadístico

Para evaluar estadísticamente si la carga total de combustibles leñosos y no leñosos entre sitios es igual o existe una diferencia significativa, se realizó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis debido al gran número de datos y que éstos no se distribuyen normalmente. En este caso, la prueba se realizó con un nivel de significancia de 0.05 y un valor de $\chi^2_{.95} = 16.919$. Posteriormente para identificar las diferencias entre sitios se utilizó una prueba post-hoc no paramétrica de Tukey (Wackerly *et al.*, 2002; Wayne, 1980).

Utilizando la misma prueba de Kruskal-Wallis para analizar si las condiciones atmosféricas de los sitios son iguales o no, se compararon los resultados de humedad y temperatura mensual entre todos los sitios con un nivel de significancia de 0.05 y un valor de $\chi^2_{.95} = 11.07$. Todo el análisis estadístico se realizó en los programas Intercooled STATA 9.1 y PASW Statistics 18.0.

5.8. Evaluación del Peligro de incendios

Para determinar el peligro de incendio de cada sitio de muestreo, se tomó como referencia el trabajo desarrollado por Zapata (1990) quien determinó un índice de potencial de peligro con base en la cuantificación del material combustible muerto estableciendo cinco clases de peligro (cuadro 4).

Cuadro 4. Índices de peligro potencial de incendio para material leñoso muerto.

Clase	Intervalos ton/ha	Grado de peligro
I	0 - 21	Bajo
II	22 - 35	Moderado
III	36 - 49	Alto
IV	50 - 63	Muy alto
V	64 - +	Extremo

Fuente: Zapata, 1990.

Sin embargo, en dicha clasificación de peligro no fue considerado el material no leñoso, es decir la hojarasca y la capa de fermentación. A pesar de ello, se utilizó el índice de Zapata ya que su trabajo se realizó bajo una similar metodología de combustibles así como el tipo de vegetación presente en este estudio.

Por otra parte, las características de pendiente y ladera de cada sitio, así como la temperatura y la humedad relativa, sirvieron como una orientación para identificar mejor los sitios con un nivel de peligro dado (García de Pedraza, 1987; Porrero, 2001; Rodríguez, *et al.*, 2002).

VI. RESULTADOS

6.1. Estructura de la vegetación

De los diez sitios de estudio se registró un total de 15 familias, 21 géneros y 44 especies y una densidad total de 6344 individuos. Los géneros con mayor número de especies fueron *Quercus* y *Pinus* con 15 y 10 especies respectivamente. Con menor frecuencia se encontraron los géneros *Abies*, *Alnus*, *Salix* y *Prunus* con una sola especie. En el estrato arbustivo sobresalen principalmente las especies *Arctostaphylos pungens*, *Comarostaphylis discolor*, *Cercocarpus macrophyllus* y *Litsea neesiana*. El mayor aporte de volumen maderable se encontró en los sitios 7 que es *Pinus-Quercus* y 8 de *Pinus-Quercus-Abies*, con valores superiores a 1000 m³, en los cuales la altura promedio de los árboles fluctuó entre 29.0 y 28.3 m respectivamente (Cuadro 5).

Cuadro 5. Características del estrato arbóreo.

Sitio	Comunidad vegetal	Altitud (m s.n.m.)	Densidad (# de árboles /ha)	Altura promedio \geq 30 cm dap	Volumen (m ³)
1	<i>Quercus</i>	2255	772	7.4	448.9
2	<i>Quercus-Pinus</i>	2403	464	16.6	198.4
3	<i>Pinus -Quercus</i>	2439	767	19.3	247.3
4	<i>Quercus-Pinus</i>	2768	428	21.4	651.1
5	<i>Pinus-Quercus</i>	2831	716	22.8	742.5
6	<i>Pinus-Quercus</i>	2879	524	20.5	712.4
7	<i>Pinus-Quercus</i>	2911	402	29.0	1551.9
8	<i>Pinus-Quercus-Abies</i>	3010	581	28.3	1258.8
9	<i>Abies hickelii</i>	3192	932	20.2	882.8
10	<i>Pinus hartwegii</i>	3237	758	13.7	398.6

En negritas se indican los valores más altos.

En la figura 5 se observa el área basal relativa de las principales especies en los sitios de muestreo.

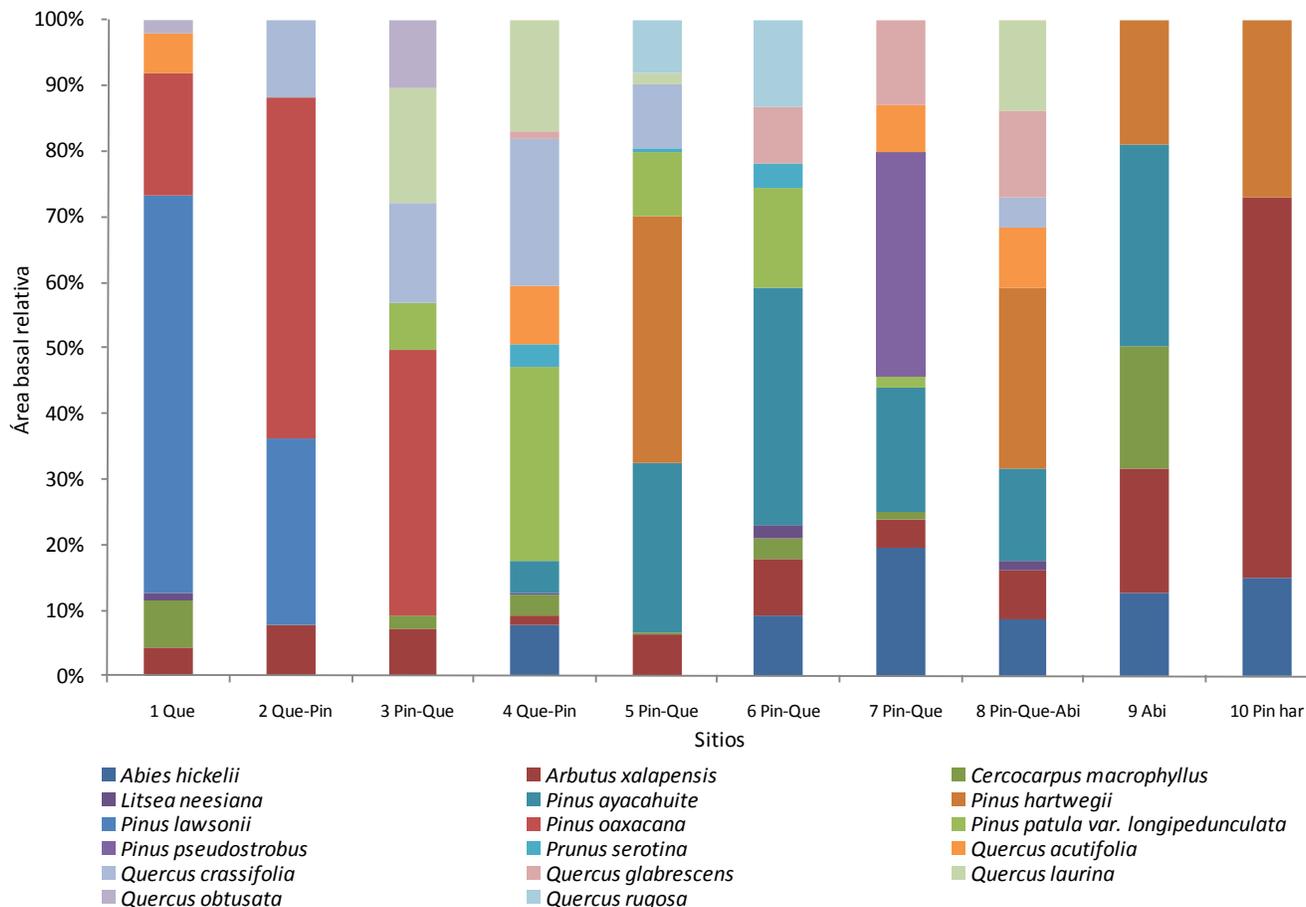


Figura 5. Área basal relativa de las principales especies.
 Sitios: Que=*Quercus*, Pin=*Pinus*, Abi=*Abies hickelii*, Pin har=*Pinus hartwegii*.

De manera general, el género *Pinus* fue el que tuvo los mayores valores de área basal relativa en la mayoría de los sitios. En el sitio 1, la especie con mayor área basal fue *Pinus lawsonii*, mientras que en los sitios 2 y 3 fue *P. oaxacana*. En los sitios 5 y 8 fue *P. hartwegii*, y en los sitios 6 y 9 fue *P. ayacahuite* que resultaron las especies con mayor área basal. El tipo de vegetación fue el mismo en más de un sitio de estudio, por ejemplo en los sitios 2 y 4 dominaron los bosques mixtos de *Quercus-Pinus*, mientras que los sitios 5, 6 y 7 los bosques de *Pinus-Quercus*. A pesar de ello los valores de densidad, frecuencia y dominancia variaron considerablemente entre sitios.

En la densidad de los sitios 1, 2 y 6 dominaron las especies del género *Quercus* en especial *Q. aff. obtusata* (50.9%), *Q. laeta* (25.4%) y *Q. affinis* (25%) respectivamente. Los sitios 1 y 9 están representados prácticamente por una sola especie *Quercus aff. obtusata* y *Abies hickelii*

con un 50.9% y 74.6% respectivamente; mientras que en el sitio 10 fue *Pinus hartwegii* con un 99.5% de un total de tres especies, por lo que puede considerarse un sitio mono específico (Figura 6).

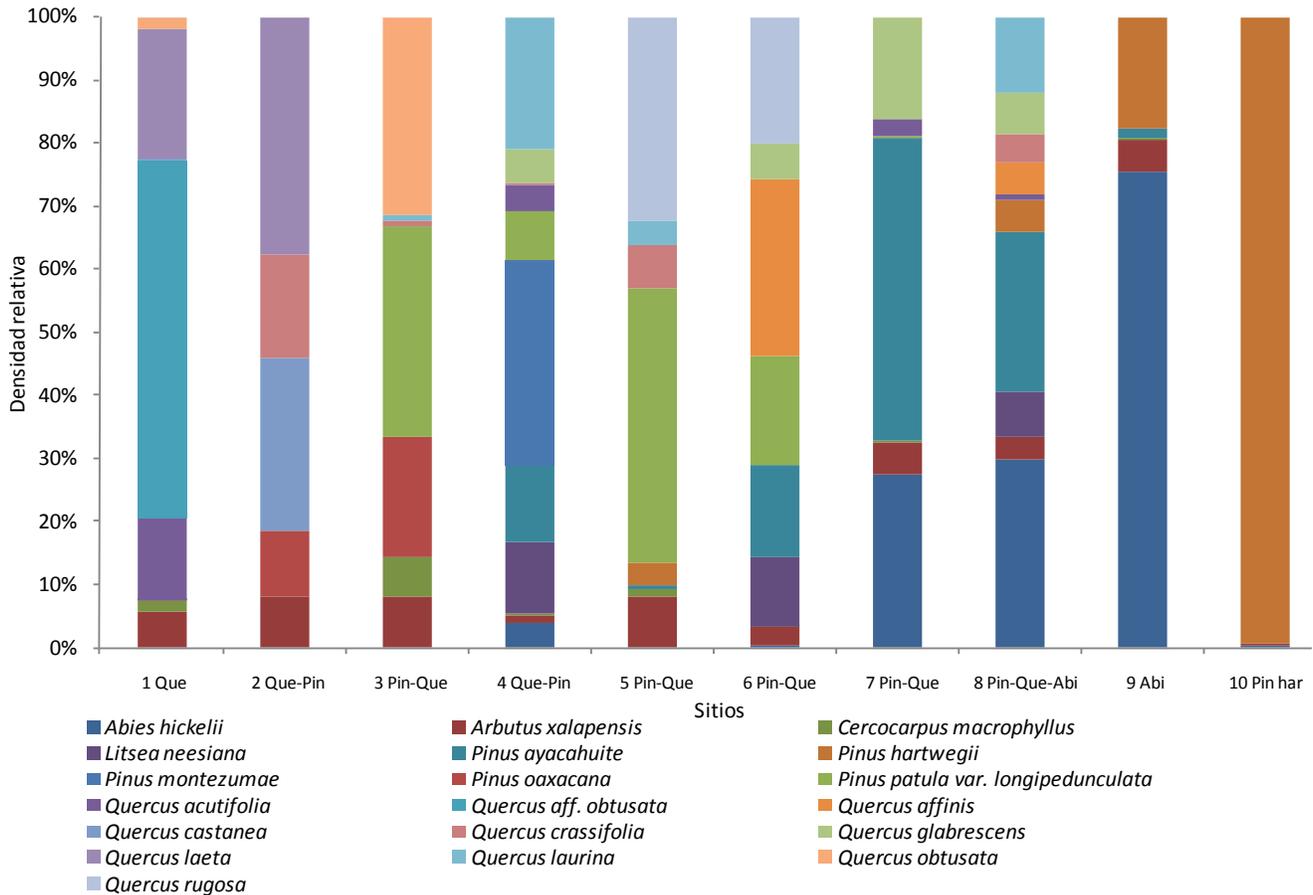


Figura 6. Densidad relativa de las principales especies.
Sitios: Que=*Quercus*, Pin=*Pinus*, Abi=*Abies hickelii*, Pin har=*Pinus hartwegii*.

En los sitios 3 y 5 la especie con mayor densidad relativa fue *Pinus patula* var. *longipedunculata*, con 31.2% y 39% respectivamente; y en el sitio 4 fue *P. montezumae*, con 24.3% de un total de 18 especies y en el sitio 7 *P. ayacahuite* con, 35.1% y 14 especies.

En cuanto a la frecuencia relativa de las especies, se puede observar que fue muy diversa entre los sitios incluso considerando sólo las especies más representativas (Figura 7). En el sitio 1, *Quercus aff. obtusata* presentó una frecuencia del 18.2%, mientras que en los sitios 2, 3, 4, 5 y 6 lo fueron *Q. castanea* con 17.9%, *Arbutus xalapensis* 22%, *Q. conzattii* 12%, *Pinus patula* var.

longipedunculata 13.5% y *Q. affinis* 12.3% respectivamente. En los sitios 7 y 8 *Pinus ayacahuite* presentó una frecuencia de 20.4% y 14.3% respectivamente. En el sitio 9 las especies *Abies hickelii* y *Pinus hartwegii* presentaron la misma frecuencia, 27%. Como en el caso de la densidad relativa, la mayor frecuencia del sitio 10 correspondió a *Pinus hartwegii* con un 76.9%.

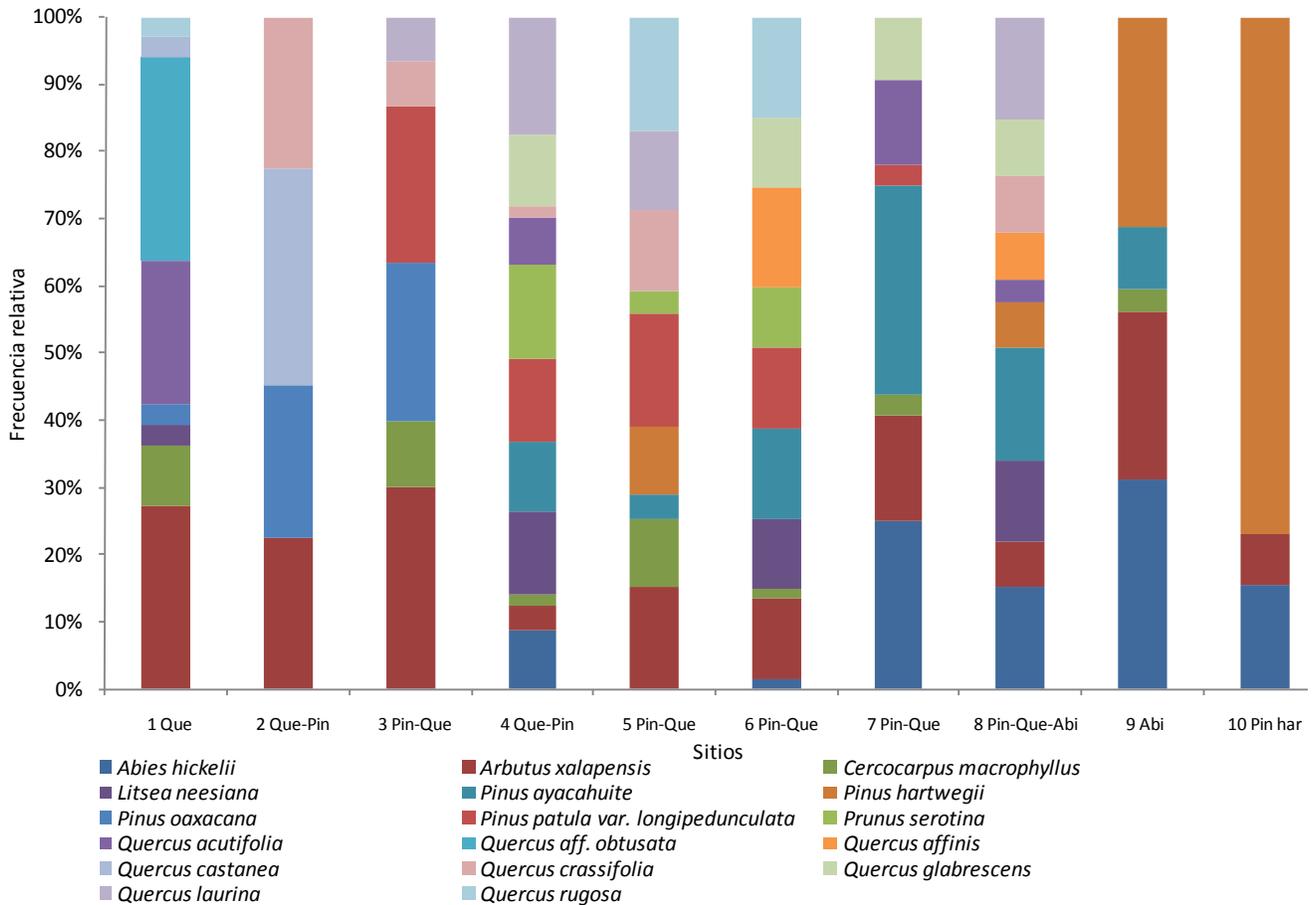


Figura 7. Frecuencia relativa de las principales especies.
Sitios: Que=*Quercus*, Pin=*Pinus*, Abi=*Abies hickelii*, Pin har=*Pinus hartwegii*.

Los resultados de la dominancia relativa de las especies más importantes de cada sitio se muestran en la figura 8. *Quercus aff. obtusata* en el sitio 1 tuvo una dominancia del 39.2% de un total de 13 especies. En los sitios 2, 3, 4 y 5 fueron determinantes *Pinus lawsonii* 29.1%, *P. oaxacana* 49.7%, *P. montezumae* 32.4% y *P. patula var. longipedunculata* con un 37%. En los sitios 6, 7 y 8 la mayor dominancia relativa correspondió a la misma especie *Pinus ayacahuite*

con 37.5%, 41.9% y 32%, respectivamente. Nuevamente *Abies hickelii* con 65.4% y *Pinus hartwegii* con 99.5% representan en dominancia a los sitios 9 y 10.

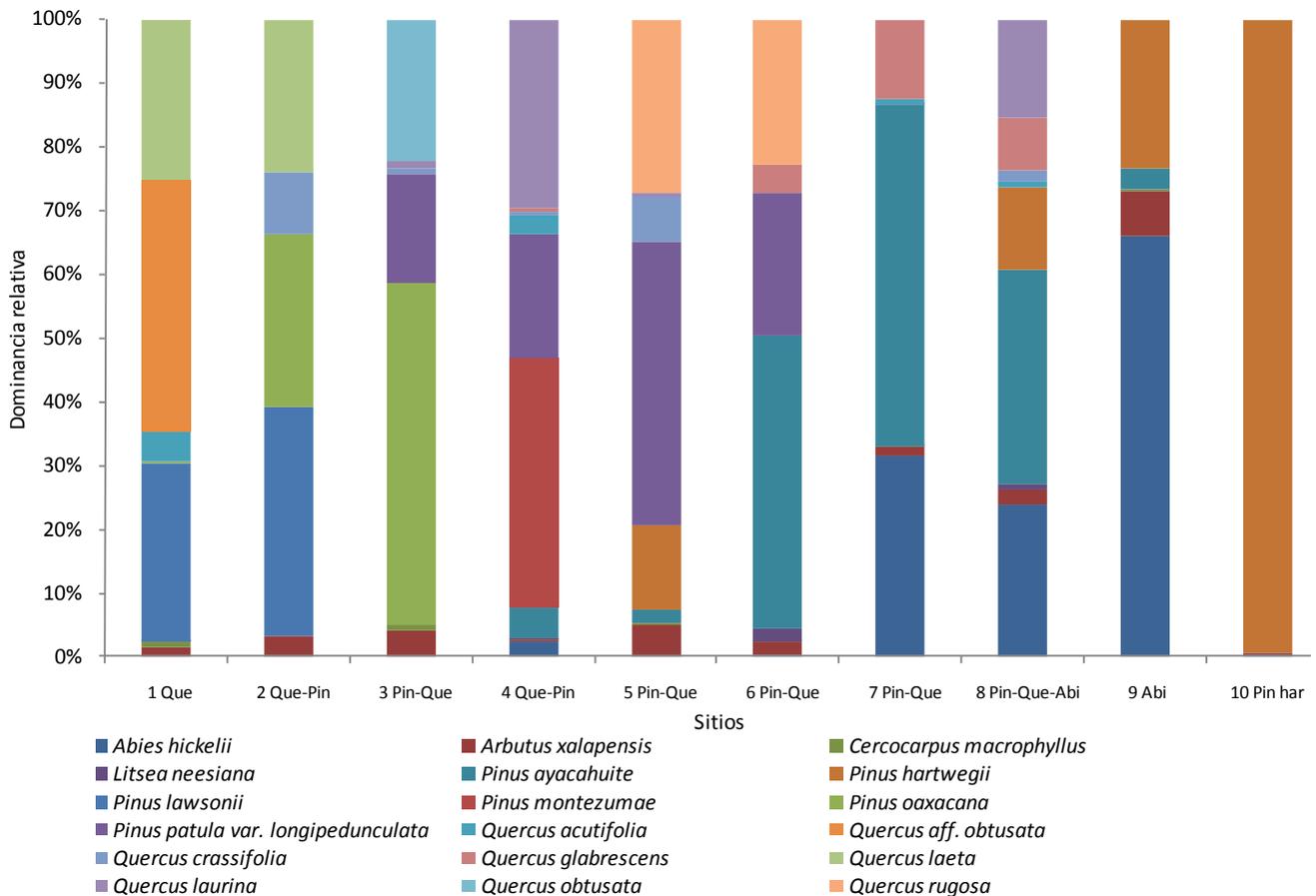


Figura 8. Dominancia relativa de las principales especies.
Sitios: Que=*Quercus*, Pin=*Pinus*, Abi=*Abies hickelii*, Pin har=*Pinus hartwegii*.

6.2. Valor de Importancia Relativa

En el sitio 1 la especie más importante fue *Quercus aff. obtusata* ya que presentó un VIR de 36.1%, mientras que en los sitios 2, 3, 4 y 5 las especies con un mayor VIR fueron *Pinus lawsonii* 20.8%, *P. oaxacana* 28.2%, *P. montezumae* 22.9% y *P. patula var. longipedunculata* con 29.8% respectivamente. En los cuadros del 1 al 10 del anexo 1, se muestra el VIR de cada una de las especies en los distintos sitios. En los sitios 6, 7 y 8 la especie más representativa fue *Pinus ayacahuite*, con un VIR de 20.7%, 32.5% y 22.7% para cada uno; no obstante, la composición de

especies fue muy distinta entre estos sitios. En los sitios 9 y 10, estuvo muy representada una sola especie, *Abies hickelii* con un 55.7% y *Pinus hartwegii* con 92% respectivamente.

6.3. Estructura vertical y diamétrica

Las especies arbóreas mostraron alturas que van desde 1.3 hasta 50 m, aunque con un bajo porcentaje en las mayores alturas. En la mayoría de los sitios, la altura de los árboles se encontró en el intervalo entre 10.1 y 20 m (Cuadro 6). En los sitios 1, 2 y 6 gran parte de los individuos registraron una altura entre 5.1 y 10 m principalmente las especies *Q. affinis*, *Q. aff. Obtusata* y *Q. laeta*, mientras que en el sitio 3 el mayor porcentaje de árboles se concentró en el intervalo de 3.1 a 5 m. Las principales especies con alturas de más de 30 m fueron *Abies hickelii*, *Pinus ayacahuite* y *P. hartwegii*.

Cuadro 6. Estructura vertical por intervalos de clase.

Sitio	Comunidad vegetal	Altura (m)											
		1.3 - 3		3.1 - 5		5.1 - 10		10.1 - 20		20.1 - 30		> 30	
		Ind.	%	Ind.	%	Ind.	%	Ind.	%	Ind.	%	Ind.	%
1	<i>Quercus</i>	178	23.1	248	32.1	312	40.4	32	4.1	2	0.3	0	0.0
2	<i>Quercus-Pinus</i>	63	13.6	75	16.2	223	48.2	89	19.2	11	2.4	2	0.4
3	<i>Pinus -Quercus</i>	197	25.7	237	30.9	177	23.1	120	15.6	36	4.7	0	0.0
4	<i>Quercus-Pinus</i>	95	22.2	72	16.8	93	21.7	107	25.0	54	12.6	7	1.6
5	<i>Pinus-Quercus</i>	61	8.5	82	11.5	187	26.1	271	37.8	100	14.0	15	2.1
6	<i>Pinus-Quercus</i>	64	12.2	85	16.2	185	35.3	127	24.2	58	11.1	5	1.0
7	<i>Pinus-Quercus</i>	31	7.7	41	10.2	60	14.9	110	27.4	93	23.1	67	16.7
8	<i>Pinus-Quercus-Abies</i>	73	12.6	48	8.3	134	23.1	159	27.4	105	18.1	62	10.7
9	<i>Abies hickelii</i>	118	12.7	76	8.2	308	33.1	309	33.2	107	11.5	13	1.4
10	<i>Pinus hartwegii</i>	116	15.3	112	14.8	246	32.5	281	37.1	3	0.4	0	0.0
Total No. Ind.		996		1076		1925		1605		569		171	

En negritas se indican los porcentajes más altos.

En cuanto al diámetro de los árboles, es interesante notar que se registraron individuos con tamaños desde 1 hasta 234 cm, es decir un amplio intervalo que incluye desde árboles

juveniles a maduros. En el cuadro 7 se puede observar que, con excepción del sitio 3, en el resto de los sitios los máximos porcentajes se encuentran en el intervalo entre 10.1 y 30 cm.

Las especies con los mayores diámetros fueron *Pinus ayacahuite*, *P. lawsonii*, *Quercus aff. obtusata* y *Q. laeta*. Por otro lado, se reconoce a *P. oaxacana* y *P. patula* var. *longipedunculata* como las especies que presentaron los diámetros más pequeños. En el caso de *Abies hickelii*, se registró una gran cantidad de individuos de diámetros pequeños y grandes.

Cuadro 7. Estructura diamétrica por intervalos de clase.

Sitio	Comunidad vegetal	Diámetro (cm)											
		1 - 2.5		2.6 - 5		5.1 - 10		10.1 - 30		30.1 - 50		> 50	
		Ind.	%	Ind.	%	Ind.	%	Ind.	%	Ind.	%	Ind.	%
1	<i>Quercus</i>	30	3.9	45	5.8	203	26.3	326	42.2	90	11.7	78	10.1
2	<i>Quercus-Pinus</i>	29	6.3	36	7.8	91	19.7	247	53.3	51	11.0	9	1.9
3	<i>Pinus -Quercus</i>	163	21.3	227	29.6	189	24.6	132	17.2	43	5.6	13	1.7
4	<i>Quercus-Pinus</i>	56	13.1	63	14.7	56	13.1	162	37.9	58	13.6	33	7.7
5	<i>Pinus-Quercus</i>	36	5.0	65	9.1	120	16.8	369	51.5	87	12.2	39	5.4
6	<i>Pinus-Quercus</i>	35	6.7	48	9.2	77	14.7	250	47.7	61	11.6	53	10.1
7	<i>Pinus-Quercus</i>	3	0.7	18	4.5	52	12.9	168	41.8	76	18.9	85	21.1
8	<i>Pinus-Quercus-Abies</i>	53	9.1	43	7.4	78	13.4	259	44.6	81	13.9	67	11.5
9	<i>Abies hickelii</i>	70	7.5	84	9.0	136	14.6	451	48.4	137	14.7	53	5.7
10	<i>Pinus hartwegii</i>	14	1.8	64	8.4	142	18.7	410	54.1	100	13.2	28	3.7
Total No. Ind.		489		693		1144		2774		784		458	

En negritas se indican los porcentajes más altos.

6.4. Carga de combustibles

En el cuadro 8 se presenta la carga de combustibles muertos en Mg ha^{-1} , tanto de las diferentes clases diamétricas como del material no leñoso de cada sitio. De manera general, se pueden distinguir dos grupos de cargas totales, es decir sitios que presentaron valores menores a 50 y aquéllos superiores a los 100 Mg ha^{-1} . Los sitios 1, 2, 8, 9 y 10 presentaron cargas menores a 50 Mg ha^{-1} mientras que los sitios 3, 4, 5, 6 y 7 exhibieron cargas por arriba de 100 Mg ha^{-1} .

La máxima carga de combustibles totales, es decir tanto del material leñoso como el no leñoso fue de 164.2 Mg ha⁻¹ y se presentó en el sitio 6. En este caso el mayor aporte de la carga estuvo representado por la clase mayor a 7.5 cm, con 99.5 Mg ha⁻¹. Por lo contrario, la menor carga registrada fue de 17.2 Mg ha⁻¹, y correspondió al sitio 10. En los sitios 4 y 10 no se obtuvo la carga de la capa de fermentación, ya que debido a cuestiones prácticas no fue posible medir la profundidad de la capa.

Cuadro 8. Carga de combustibles muertos leñosos y no leñosos expresado en Mg ha⁻¹.

Sitio	Comunidad Vegetal	Leñosos					No leñosos		TOTAL Mg ha ⁻¹
		Clases diamétricas (cm)					Hojarasca	*CF	
		< 0.6	0.6 - 2.5	2.6 - 7.5	> 7.5	∑			
1	<i>Quercus</i>	0.3	1.2	0.6	0.8	2.9	10.0	14.9	27.9
2	<i>Quercus-Pinus</i>	0.1	1.6	0.9	1.0	3.6	15.6	17.4	36.6
3	<i>Pinus-Quercus</i>	0.3	2.1	4.7	66.2	73.3	15.3	23.6	112.2
4	<i>Quercus-Pinus</i>	0.6	6.6	10.1	75.6	93.0	33.2	-	126.2
5	<i>Pinus-Quercus</i>	0.5	2.0	1.8	24.9	29.2	18.8	53.0	101.1
6	<i>Pinus-Quercus</i>	0.4	2.7	6.7	99.5	109.3	17.8	37.1	164.2
7	<i>Pinus-Quercus</i>	0.3	1.3	1.6	63.9	67.1	7.8	25.3	100.1
8	<i>Pinus-Quercus-Abies</i>	0.3	2.7	4.3	13.2	20.4	12.8	15.7	48.9
9	<i>Abies hickelii</i>	0.4	2.0	3.6	9.1	15.1	7.0	16.5	38.5
10	<i>Pinus hartwegii</i>	0.1	2.7	1.8	3.1	7.7	9.5	-	17.2

* CF= Capa de fermentación. Calculado a partir del estudio de Alvarado *et al.* (2008).

En negritas se indican los valores más altos.

En la figura 9 se observa como la mayor cantidad de combustibles totales corresponde con las comunidades vegetales de *Pinus-Quercus* y al sitio 4 de *Quercus-Pinus*. Las comunidades con menor carga fueron prácticamente la de *Quercus* (sitio 1) y *Pinus hartwegii* (sitio 10). Es notable la gran diferencia que se presenta en el sitio 6 (164.2 Mg ha⁻¹) con respecto al 10 (17.2 Mg ha⁻¹).

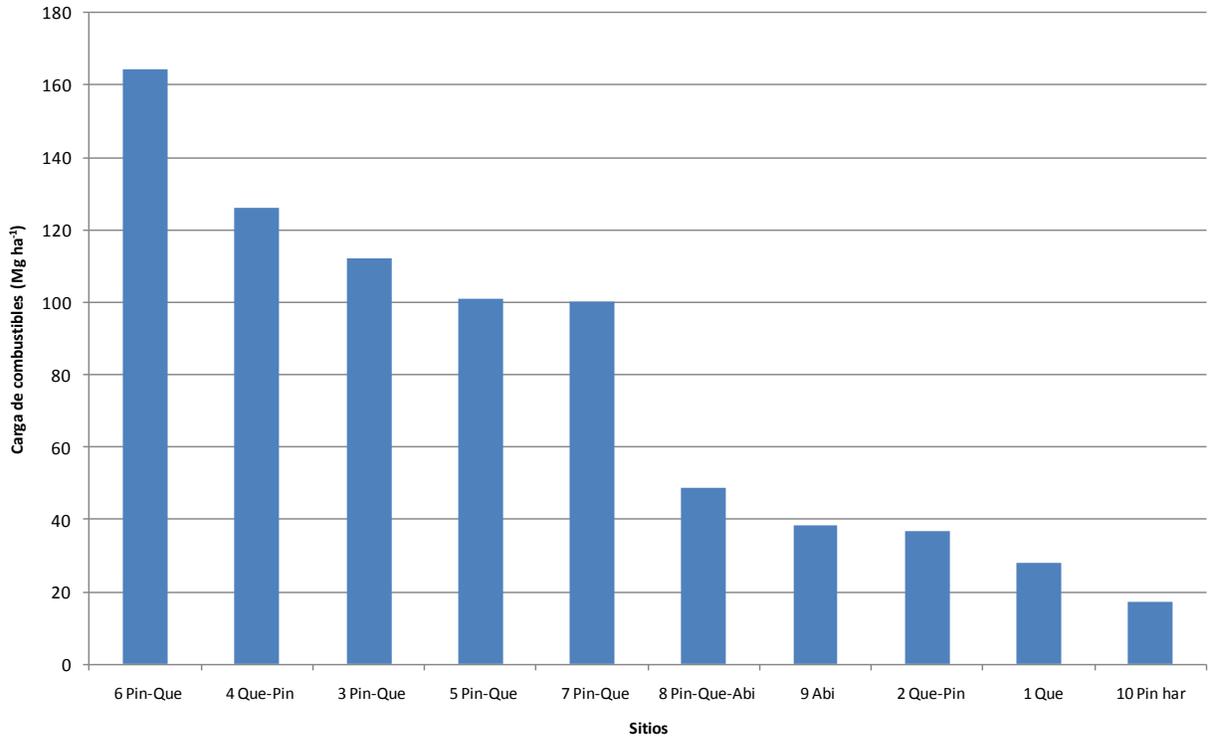


Figura 9. Carga de combustibles totales por comunidad vegetal.
Sitios: Que=*Quercus*, Pin=*Pinus*, Abi=*Abies hickelii*, Pin har=*Pinus hartwegii*.

De acuerdo con el análisis estadístico no paramétrico de Kruskal-Wallis, se obtuvo una diferencia significativa en la carga de los combustibles tanto leñosos como no leñosos entre los sitios con los valores de $P < 0.05$ (Cuadro 9). Aplicando la prueba de Tukey, se mostró que el sitio 4 *Quercus-Pinus* y 5 *Pinus-Quercus*, prácticamente fueron los que más difieren con el resto de los sitios, lo cual se corrobora con la máxima carga de combustibles registradas principalmente para el sitio 4.

Cuadro 9. Valores obtenidos por medio de Kruskal-Wallis. Carga de combustibles.

Valor calculado	Leñosos				No leñosos	
	Clases diamétricas (cm)				Hojarasca	*CF
	< 0.6	0.6 - 2.5	2.6 - 7.5	> 7.5		
<i>H</i>	54.098	37.206	76.311	75.790	632.601	479.736
<i>P</i>	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001

* CF= Capa de fermentación.

En la mayoría de los sitios, la carga se incrementó conforme aumentó el diámetro de los combustibles. En la clase menor a 0.6 cm, la diferencia de cargas aunque significativa entre sitios, fue menor con respecto a los combustibles con mayor diámetro, así como en la hojarasca y la capa de fermentación, en los cuales las diferencias se acentuaron más. Las principales cargas de combustibles en la mayoría de los sitios estuvieron determinadas por los valores de la capa de fermentación, así como por la clase mayor a 7.5 cm (Cuadro 10).

En el sitio 10 el combustible más representativo fue la hojarasca, sin embargo su valor de carga fue de los menores, con 8.3 Mg ha⁻¹. La dispersión de los combustibles muertos en casi todos los sitios fue prácticamente de tipo uniforme. No obstante, de manera particular en los sitios 4 y 6 la dispersión presentó una disposición agregada debido a que en ambos sitios se realizaron trabajos de saneamiento forestal, durante los cuales parte del material combustible se acomodó en forma de barreras.

Cuadro 10. Principal combustible y su dispersión.

Sitio	Comunidad vegetal	Principal combustible	Dispersión
1	<i>Quercus</i>	Capa de fermentación	Uniforme
2	<i>Quercus-Pinus</i>	Capa de fermentación	Uniforme
3	<i>Pinus-Quercus</i>	Mayor a 7.5 cm	Uniforme
4	<i>Quercus-Pinus</i>	Mayor a 7.5 cm	Agregada
5	<i>Pinus-Quercus</i>	Capa de fermentación	Uniforme
6	<i>Pinus-Quercus</i>	Mayor a 7.5 cm	Agregada
7	<i>Pinus-Quercus</i>	Mayor a 7.5 cm	Uniforme
8	<i>Pinus-Quercus-Abies</i>	Capa de fermentación	Uniforme
9	<i>Abies hickelii</i>	Capa de fermentación	Uniforme
10	<i>Pinus hartwegii</i>	Hojarasca	Uniforme

6.5. Relación superficie/volumen de combustibles

En cuanto a la relación superficie/volumen de los combustibles muertos, la variación fue mínima entre los sitios de muestreo (Figura 10). Puntualizando, en los sitios 1, 9 y 10 no se registraron combustibles mayores a 7.5 cm ya que su densidad fue muy baja, por el contrario en el sitio 5 se obtuvieron los máximos valores de $155.1 \text{ m}^2/\text{m}^3$ en los combustibles de esta clase. En las diferentes clases diamétricas, la relación que existe entre la superficie y el volumen de los combustibles fue inversamente proporcional a su diámetro. Los combustibles con mayor diámetro mostraron una menor relación, mientras que con un menor diámetro la relación fue mayor.

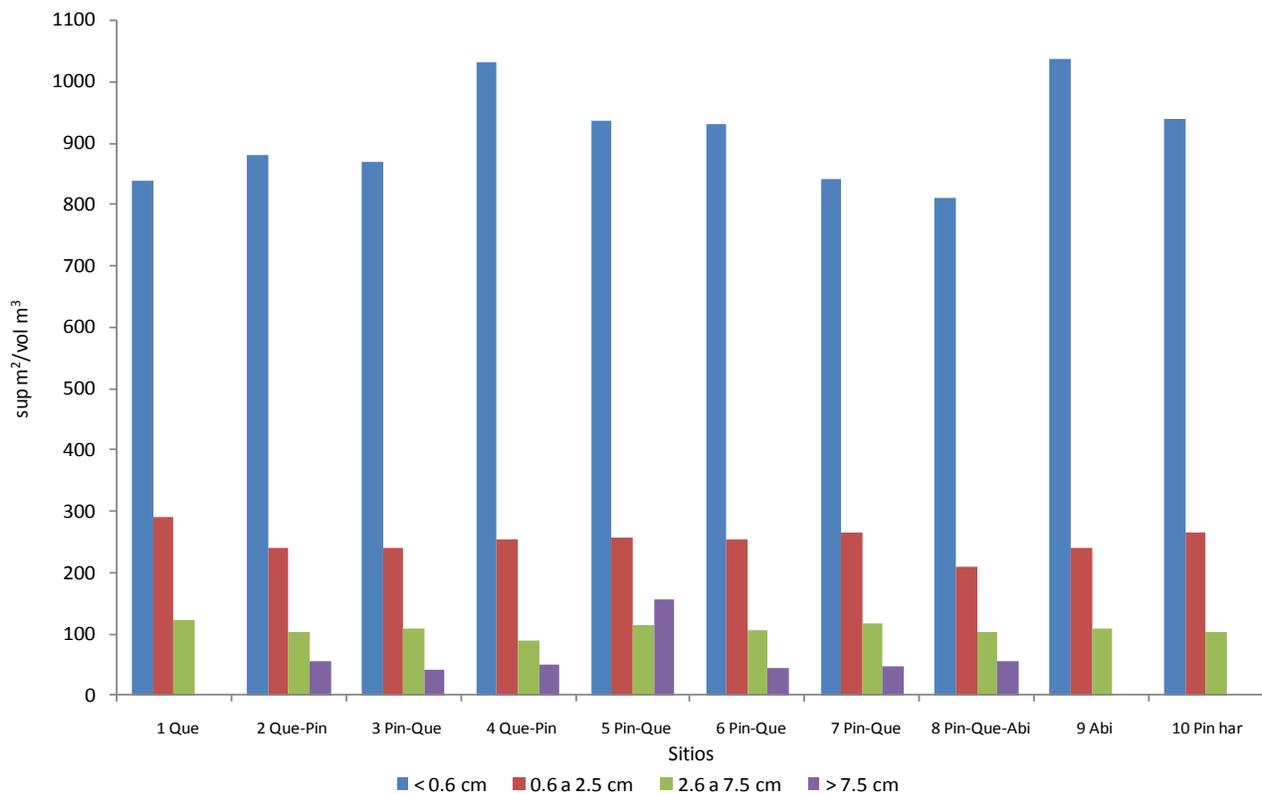


Figura 10. Relación superficie/volumen por clase diamétrica.
Sitios: Que=*Quercus*, Pin=*Pinus*, Abi=*Abies hickelii*, Pin har=*Pinus hartwegii*.

Dado que en la mayoría de los sitios los valores de la relación presentaron mínimas diferencias, los datos que se reportan a continuación hacen referencia al promedio de todos los sitios. En los combustibles menores a 0.6 cm, el promedio de la relación fue de $912.2 \text{ m}^2/\text{m}^3$. La clase de 0.6 a

2.5 cm, mostró en promedio $251.6 \text{ m}^2/\text{m}^3$, mientras que en la clase de 2.6 a 7.5 cm fue de $107.6 \text{ m}^2/\text{m}^3$. En los combustibles con diámetro mayor a 7.5 cm la relación fue de $49 \text{ m}^2/\text{m}^3$ sin considerar al sitio 5, ya que el valor obtenido en éste sitio fue mucho mayor que en los demás.

6.6. Mapa de combustibles forestales

El patrón de la distribución de la carga de combustibles se muestra en la figura 11. Las categorías establecidas se obtuvieron considerando todas las cargas registradas, desde la mínima, de 17.2 Mg ha^{-1} , hasta la máxima de 164.2 Mg ha^{-1} . Dicha distribución corresponde con los tipos de vegetación descritos por Trejo (2009) (ver figura 2). Se puede distinguir en el mapa que la mayor extensión del municipio presenta una carga entre los 100 y 101 Mg ha^{-1} , que corresponden con los principales bosques de *Pinus-Quercus*.

En la parte más baja del municipio se clasificaron las cargas mínimas, que corresponden principalmente a los bosques de *Quercus*, con excepción del sitio 10 (*Pinus hartwegii*) que fue el que registró la menor cantidad de combustibles. Las máximas cargas presentaron una distribución restringida; tal fue el caso de los sitios 4, 6, y en algunas superficies cercanas al municipio.

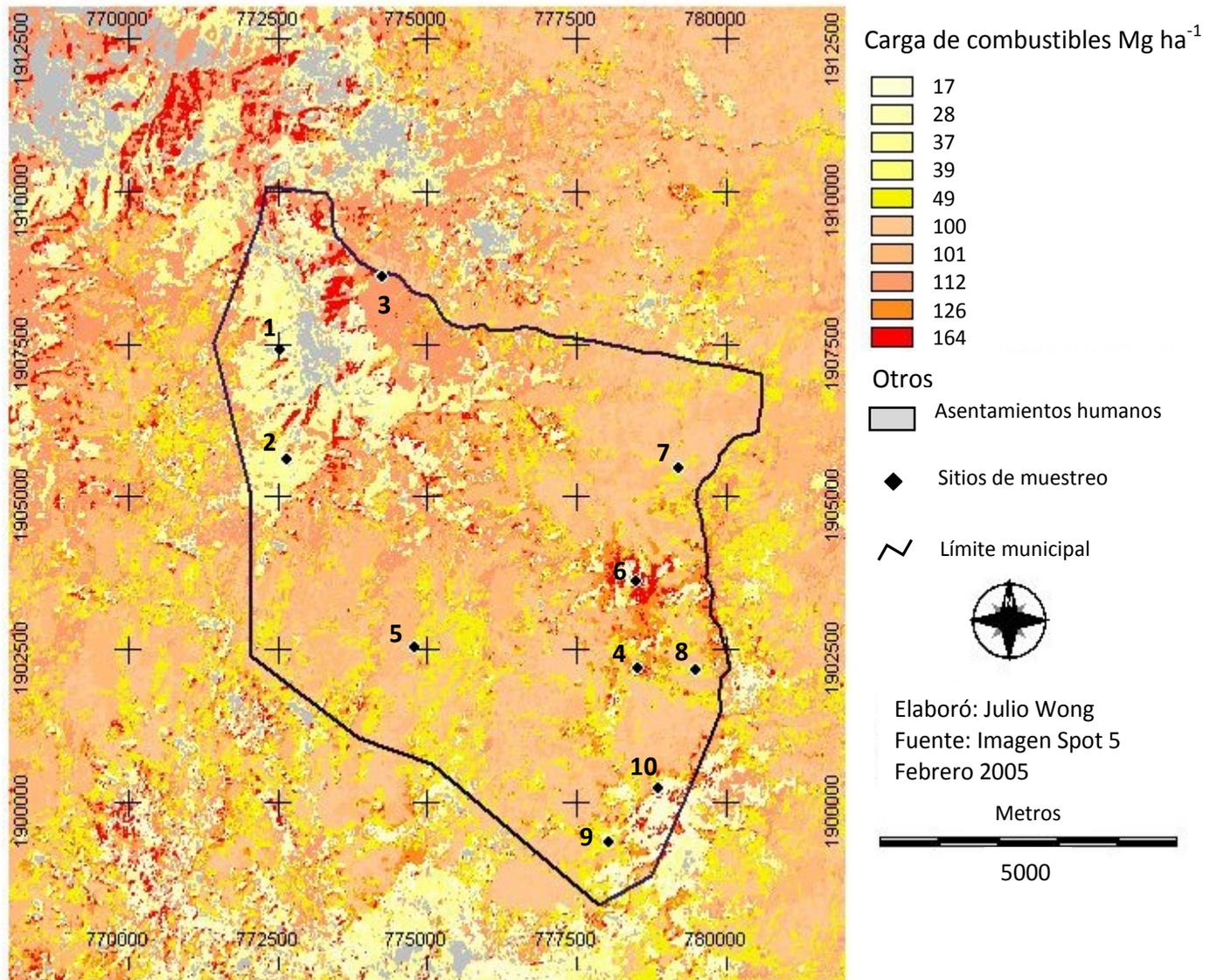


Figura 11. Distribución de la carga de combustibles en el municipio de Yavesía.

6.7. Características topográficas

En el cuadro 11 se presenta un resumen de las tres variables topográficas medidas. Gran parte de los sitios presentaron una pendiente muy variable (entre 8% y 76%) debido al relieve complejo del área de estudio. Sólo el sitio 10 se localizó sobre una superficie plana, con una pendiente promedio de 8%. Cabe resaltar que la irregularidad del terreno se presentó desde las partes más bajas hasta las máximas altitudes del municipio.

Cuadro 11. Características topográficas.

Sitio	Comunidad vegetal	Pendiente %	Superficie del terreno*	Orientación de ladera	Altitud (m s.n.m.)
1	<i>Quercus</i>	52	Cóncava	SE	2255
2	<i>Quercus-Pinus</i>	34	Cóncava	SW	2403
3	<i>Pinus-Quercus</i>	53	Cóncava - Plana	N - SW	2439
4	<i>Quercus-Pinus</i>	38	Cóncava	NE	2768
5	<i>Pinus-Quercus</i>	76	Cóncava	NW	2831
6	<i>Pinus-Quercus</i>	29	Cóncava	SW	2879
7	<i>Pinus-Quercus</i>	43	Cóncava - Plana	N	2911
8	<i>Pinus-Quercus-Abies</i>	49	Cóncava	SE	3010
9	<i>Abies hickelii</i>	25	Cóncava	NE	3192
10	<i>Pinus hartwegii</i>	8	Plana	NE	3237

* Determinada por el autor en términos generales: cóncava, convexa y/o plana.

En siete de los sitios muestreados, prácticamente el 80% de los círculos se encontraron sobre superficies cóncavas, de pendientes y orientación variables. Por otra parte, las principales orientaciones de laderas registradas fueron norte y sur; SE, SW, NE y NW.

6.8. Condiciones atmosféricas

La variación de temperatura, así como de la humedad relativa, se obtuvo sólo en seis de los diez sitios de estudio (Figura 12). El comportamiento de la temperatura durante el transcurso del año fue muy similar entre los sitios, y en el sitio 2 fue donde se registraron los valores máximos hasta 17.5° C. Abril y mayo fueron los meses más calurosos, mientras que noviembre, diciembre y enero los más fríos con temperaturas hasta 5.2° C (diciembre) en el sitio 10. Las variaciones de humedad relativa, también fueron muy semejantes entre los sitios durante el año. Nuevamente se distingue el sitio 2 en este caso con los menores porcentajes de humedad (50% en marzo), lo cual corresponde con la temperatura registrada en ese mes. Los meses más húmedos fueron julio y septiembre (101.5% en el sitio 7), con una notable disminución en agosto.

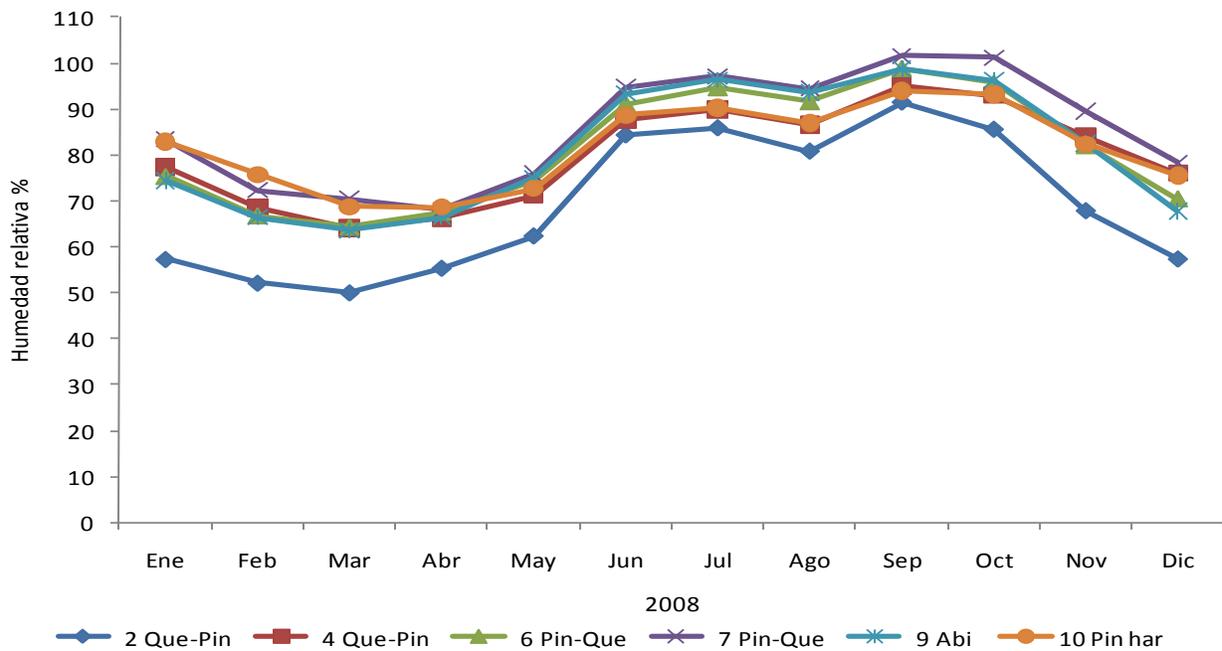
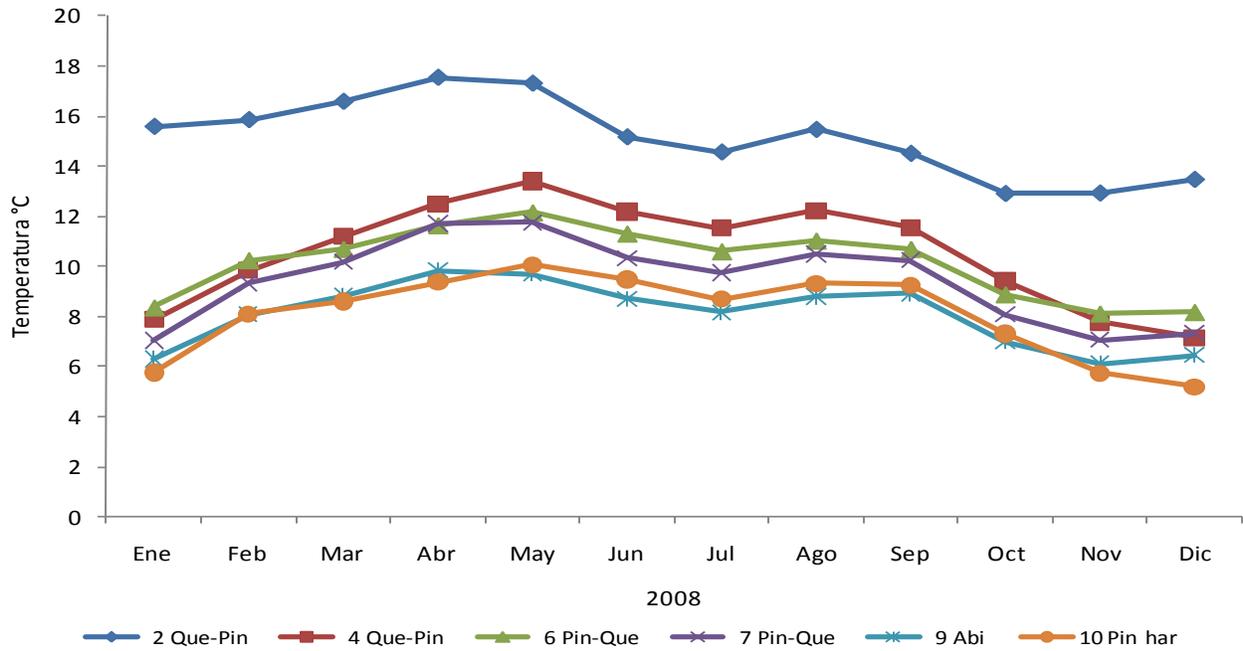


Figura 12. Temperatura y humedad relativa media mensual.
 Sitios: Que=*Quercus*, Pin=*Pinus*, Abi=*Abies hickelii*, Pin har=*Pinus hartwegii*.

Aunque las condiciones de temperatura y humedad mostraron el mismo comportamiento en el transcurso del año, el análisis por medio de Kruskal-Wallis mostró diferencias significativas de las condiciones entre cada uno de los sitios ($P < 0.05$) (Cuadro 12). En el caso de la humedad

el mes de abril fue el único que no presentó una diferencia con un valor de $H = 10.5$ y una $P > 0.05$. La prueba de Tukey confirma la diferencia significativa principalmente del sitio 2 *Quercus-Pinus* con los demás sitios, lo mismo que se puede apreciar en la figura 12.

Cuadro 12. Valores obtenidos por medio de Kruscal-Wallis. Humedad y temperatura.

Valor calculado	Mes											
	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
Humedad												
<i>H</i>	33.698	27.742	33.087	10.599	13.665	34.634	75.062	72.314	105.139	85.508	29.348	36.822
<i>P</i>	0.0001	0.0001	0.0001	0.0599*	0.0179	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
Temperatura												
<i>H</i>	73.680	86.202	102.009	90.312	109.618	148.499	150.573	162.581	133.016	93.074	73.328	116.050
<i>P</i>	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001

* $P > 0.05$ no significativamente diferentes.

En el cuadro 13 se describe la relación de temperatura y humedad relativa con la orientación y la altitud de cada sitio. Como se mencionó, las temperaturas máximas así como los menores porcentajes de humedad, pertenecieron al sitio 2 que se localiza en la parte más baja del municipio.

Cuadro 13. Condiciones atmosféricas y topográficas.

Sitio	Comunidad vegetal	Temp. promedio anual (°C)	Hr. promedio anual (%)	Orientación ladera	Altitud (m s.n.m.)
1	<i>Quercus</i>	-	-	SE	2255
2	<i>Quercus-Pinus</i>	15.2	69.2	SW	2403
3	<i>Pinus-Quercus</i>	-	-	N - SW	2439
4	<i>Quercus-Pinus</i>	10.6	80.0	NE	2768
5	<i>Pinus-Quercus</i>	-	-	NW	2831
6	<i>Pinus-Quercus</i>	10.2	81.1	SW	2879
7	<i>Pinus-Quercus</i>	9.4	85.6	N	2911
8	<i>Pinus-Quercus-Abies</i>	-	-	SE	3010
9	<i>Abies hickelii</i>	8.1	81.2	NE	3192
10	<i>Pinus hartwegii</i>	8.1	81.7	NE	3237

Por otra parte, en los sitios 9 y 10 se registraron las temperaturas promedio más bajas (8.1°C), con valores de humedad superiores al 80%. Estos sitios se localizaron en la parte más alta, por arriba de los 3000 m s.n.m., por lo que las condiciones suelen ser más frías y húmedas, lo que correspondió con la orientación NE donde las condiciones son más frías. Por el contrario, las laderas orientadas al SE y SW tienden a ser más secas y cálidas, como en el caso de los sitios 1 y 2. En el resto de los sitios los valores de temperatura media anual fluctuaron entre 9.4° y 10.6°C mientras que la humedad presentó una variación de 80.0% a 85.6%. Se observa que la temperatura disminuye conforme se asciende en altitud. Debido a que los sitios localizados a una mayor altitud presentaron elevados porcentajes de humedad relativa, la humedad de los combustibles muertos se puede incrementar, de manera que en ellos se reduce la probabilidad de que ocurra un incendio.

Dada la importancia de las condiciones atmosféricas en los incendios, en la figura 13 se muestra con mayor detalle el comportamiento de la temperatura y la humedad durante el transcurso del día en los meses de abril y mayo, ya que fueron los más calurosos y en los cuales se incrementa el peligro de incendios.

Conforme el día avanza en la mayoría de los sitios se presentó una relación inversa, es decir, la temperatura se incrementó entre las 08:00 y 09:00 am, mientras que la humedad disminuyó progresivamente. Las máximas temperaturas y los menores porcentajes de humedad prevalecieron entre las 12:00 y las 15:00 pm. En este período es posible que el contenido de humedad de los combustibles muertos se reduzca a menos del 25%, incrementándose la posibilidad de que se incendien con mayor facilidad.

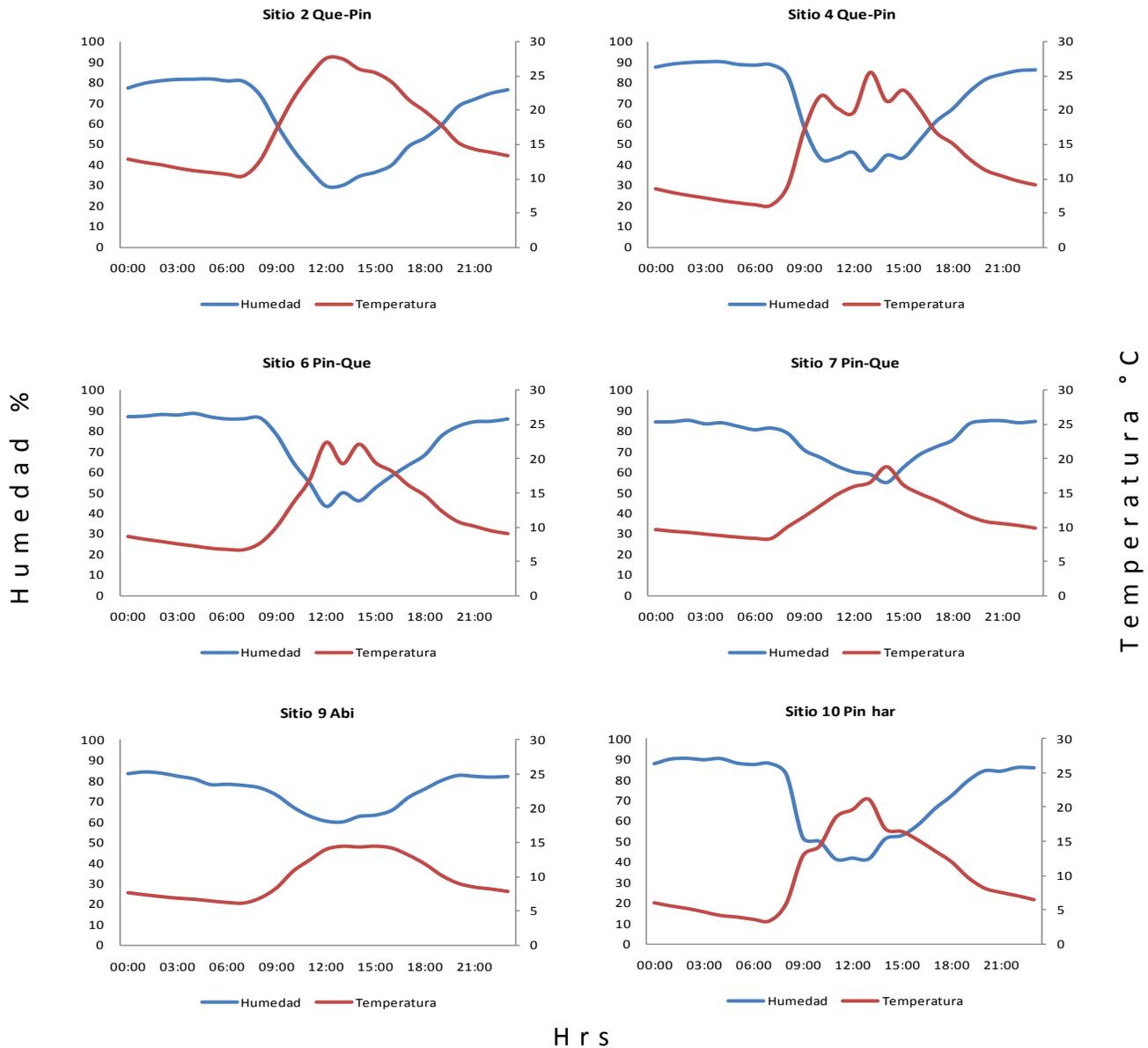


Figura 13. Temperatura y humedad relativa promedio por hora. Abril y mayo.
 Sitios: Que=*Quercus*, Pin=*Pinus*, Abi=*Abies hickelii*, Pin har=*Pinus hartwegii*.

En el sitio 9 *Abies hickelii*, los porcentajes de humedad se mantuvieron siempre por arriba de la temperatura mientras que en los demás sitios se puede observar como ambas variables cruzaron en determinada hora. Llama la atención el hecho de que tanto en el sitio 4 *Quercus-Pinus* como en el sitio 6 *Pinus-Quercus*, se presentó un singular comportamiento de la temperatura y la humedad, ya que se observaron dos picos de temperatura en el sitio 6 y tres en el sitio 4, lo cual ocurre también con la humedad.

6.9. Peligro de incendios

Para determinar el peligro de incendios, en el cuadro 14 se presenta un resumen general de la carga de combustibles, así como de las características topográficas y atmosféricas, que en conjunto favorecen la ocurrencia de incendios en un determinado espacio y tiempo. Se observa que existe una gran variabilidad tanto en las propiedades de los combustibles, como en las condiciones de pendiente, ladera, temperatura y humedad. A pesar de que los sitios 5, 6 y 7 presentaron la misma comunidad vegetal, es decir *Pinus-Quercus*, estos registraron distinta carga de combustibles y difieren también en el resto de las características estudiadas, por lo que se analizaron de manera independiente.

Cuadro 14. Grados de Peligro de incendios en el municipio de Yavesía.

Sitio	Comunidad vegetal	Carga total leñosos	Dispersión	Pendiente %	Ladera	Temp. °C	Hr. %	*Grado de Peligro
1	<i>Quercus</i>	2.9	Uniforme	52	SE	-	-	Bajo
2	<i>Quercus-Pinus</i>	3.6	Uniforme	34	SW	15.2	69.2	Bajo
3	<i>Pinus-Quercus</i>	73.3	Uniforme	53	N - SW	-	-	Extremo
4	<i>Quercus-Pinus</i>	93.0	Agregada	38	NE	10.6	80.0	Extremo
5	<i>Pinus-Quercus</i>	29.2	Uniforme	76	NW	-	-	Moderado
6	<i>Pinus-Quercus</i>	109.3	Agregada	29	SW	10.2	81.1	Extremo
7	<i>Pinus-Quercus</i>	67.1	Uniforme	43	N	9.4	85.6	Extremo
8	<i>Pinus-Quercus-Abies</i>	20.4	Uniforme	49	SE	-	-	Bajo
9	<i>Abies hickelii</i>	15.1	Uniforme	25	NE	8.1	81.2	Bajo
10	<i>Pinus hartwegii</i>	7.7	Uniforme	8	NE	8.1	81.7	Bajo

*Grados establecidos por Zapata (1990), únicamente para combustibles leñosos.

La mitad de los sitios (1, 2, 8, 9 y 10) presentaron un peligro de incendio bajo con una distribución de combustibles uniforme. Únicamente el sitio 5 correspondió con la categoría de peligro moderado orientado al NW, pendiente de 76% y dispersión de combustibles uniforme. En el resto de los sitios (3, 4, 6 y 7) tres de ellos dominados por *Pinus*, el grado peligro de incendios fue extremo, sobresaliendo los sitios 4 y 6 con una dispersión de combustibles agregada y pendientes de 38% y 29% respectivamente.

Debido a la máxima carga de combustibles distribuidos de manera agregada en el sitio 6, así como su orientación hacia el SW, con condiciones más secas y calurosas, la probabilidad de que ocurra un incendio en el sitio puede ser alta. No obstante, la temperatura promedio del sitio fue de 10.2°C y la humedad de 81.1%. Lo anterior demuestra que, a pesar de la alta cantidad de combustibles, la probabilidad de un incendio puede ser muy baja a causa de las condiciones de alta humedad, que regula el contenido de agua en los combustibles y por lo mismo su facilidad de incendiarse.

El sitio 2, que presentó una distribución más uniforme de los combustibles, pendientes por arriba de un 52% y localizado en una ladera más seca, es decir con máximas temperaturas y mínimos porcentajes de humedad, el peligro de incendio puede ser bajo. Esto debido a que en el sitio la carga de combustibles fue la más baja en relación al resto de los sitios por lo cual, si se presentara un incendio, la posibilidad de que alcance una gran intensidad es mínima. Los sitios 9 *Abies hickelii* y 10 *Pinus hartwegii* son los lugares donde la ocurrencia de un incendio es poco probable, no sólo por su mínima carga de combustibles sino también por sus bajas temperaturas (8.1° C) y elevados porcentajes de humedad (82%).

Si bien fueron cinco los sitios que presentaron un nivel de peligro bajo, se encontró una diferencia significativa en la carga de combustibles leñosos por medio del análisis de Kruskal-Wallis con un valor de $P < 0.05$. Lo mismo ocurrió comparando las cargas de los cuatro sitios con grado de peligro extremo, no obstante en la clase diamétrica mayores a 7.5 cm no se obtuvo una diferencia entre los sitios con un valor de $P = 0.37$ ($P > 0.05$). Cabe recordar que esta clase diamétrica es el principal combustible con mayor porcentaje en estos cuatro sitios.

VII. DISCUSIÓN

El municipio de Yavesía presentó una gran riqueza de especies en los estratos arbóreo y arbustivo, un complejo relieve y una variabilidad atmosférica, que en conjunto dieron como resultado una heterogeneidad en la carga de combustibles, así como en los tipos (leñosos y no leñosos) y en su distribución potencial.

En cuanto al análisis de la estructura de la vegetación, este nos permite obtener una visión de las condiciones en las que se puede generar un incendio y de su posible comportamiento. De acuerdo con Agee *et al.* (1999) la estructura de la vegetación es muy importante para el análisis de los combustibles forestales que comprenden tanto la vegetación viva como muerta. En el presente estudio sólo se realizó el análisis estructural del estrato arbóreo y arbustivo debido a cuestiones de logística, el estrato herbáceo no fue evaluado, no obstante algunas observaciones nos indicaron una densa cobertura de herbáceas pero que no están dominadas por pastos que son potencialmente más susceptibles a incendiarse. Neri (2004) menciona que el método más eficaz para valorar el inicio de los incendios es el estudio de la inflamabilidad de los combustibles, principalmente de las herbáceas y hojarasca. Aunque no se consideraron las herbáceas en este estudio, si se obtuvieron datos precisos de la carga de hojarasca lo cual permitió una mejor apreciación en el peligro de incendio.

Un aspecto importante en la vegetación es su continuidad vertical en forma escalonada, es decir, que estén presentes y con una alta cobertura los estratos arbóreo, arbustivo y herbáceo en un mismo sitio, lo que favorecerá el posible cambio de un incendio superficial a uno de copa (Porrero, 2001), esto supone una gran continuidad vertical. En este estudio estas condiciones se registraron en el sitio 2 *Quercus-Pinus*, donde es notable la abundancia en el estrato arbustivo de *Arctostaphylos pungens* que en caso de llegar a incendiarse sus llamas podrían alcanzar la parte baja de la copa de los árboles y crear un incendio de copa, el caso contrario se presentó en el sitio 10 dominado por *Pinus hartwegii*, que carece prácticamente del estrato arbustivo, lo cual dificulta la presencia de incendios de este tipo, además de que fue el sitio con la menor carga de combustible total, lo cual reduce aún más el peligro de incendio.

Es de gran interés, principalmente en el estudio de la inflamabilidad de los combustibles y en las actividades de prevención de incendios así como en las quemas controladas, obtener información de cuáles son las especies que aportan mayor número de individuos (densidad) o mayor VIR en los sitios (Zapata, 1990; Porrero, 2001; Neri, 2004). Por ejemplo, además de que el sitio 4 presenta un grado de peligro extremo por su máxima carga de combustibles, el peligro se incrementa aun más debido a que el sitio esta domina por *Quercus laurina* con un VIR de 17.4% y de acuerdo con Neri (2004), esta especie de encino muestra un alto grado de ignitabilidad, es decir la facilidad con que un material entra en ignición. Lo mismo sucede en el sitio 10 dominado por *Pinus hartwegii* que presenta un tiempo de ignición menor a 40 segundos, sin embargo en este caso la probabilidad de peligro es baja debido a que en este bosque se observó la mínima carga de combustibles en este estudio.

Las especies que están mejor representadas en los bosques del área de Yavesía, corresponden principalmente a tres géneros: *Quercus*, *Abies* y *Pinus*. De acuerdo con Barajas *et al.* (1979) se observan diferencias puntuales en la constitución de la madera de las latifoliadas (*Quercus*) y de las coníferas (*Abies* y *Pinus*). La madera de las coníferas es más sencilla que la de latifoliadas, pues está formada principalmente por traqueidas, cuya función es la conducción del agua y sales minerales de la raíz hacia las hojas. En la madera de latifoliadas, la estructura es más compleja, con una mayor especialización y más variedad en sus elementos, siendo el más característico los vasos formados por cadenas de células tubulares que forman un sistema de conducción ascendente de soluciones (Barajas *et al.*, 1979). La madera más densa, como la de *Quercus*, tardará más en arder pero lo hará con mayor intensidad que las maderas menos densas, como la de muchos *Pinus* que arden con mayor facilidad, lo que se atribuye también a su resina (Robles y Echenique, 1983).

Considerando la información anterior, la descripción de la vegetación es un aspecto relevante en cada sitio de muestreo para tener una mejor aproximación al comportamiento del fuego. En tal caso los sitios 1 *Quercus*, 2 y 4 *Quercus-Pinus*, que están dominados por especies del género *Quercus* (Anexo 1) pueden ser comunidades más susceptibles a incendios de mayor intensidad mientras que el resto de los sitios dominados por el género *Pinus* pueden arder con facilidad pero ser menos intensos. Arnaldos *et al.* (2004) describen que el combustible principal

en los incendios es la madera, la cual está constituida por las moléculas de celulosa, hemicelulosa y lignina. Sin embargo el comportamiento del incendio dependerá no sólo de esta composición sino también de la carga y distribución de los combustibles, entre otros factores. De aquí la importancia de conocer las especies más representativas de los sitios de estudio, ya que esta información nos permite inferir el posible comportamiento del fuego, dependiendo del tipo de combustible. Es necesario aclarar que para determinar las comunidades vegetales se consideró el género con un mayor VIR (Bolfor, 2000). Por ejemplo en los sitios 2 y 4 de *Quercus-Pinus*, las especies con mayores VIR fueron *Pinus lawsonii* y *Pinus montezumae* respectivamente, sin embargo el tipo de comunidad estuvo caracterizado principalmente por el género *Quercus*. El sitio 9 se determinó especialmente por el género *Abies*, mientras que en el resto de los sitios, el VIR estuvo definido por distintas especies pero todas ellas pertenecientes al mismo género *Pinus*, por lo cual el mayor aporte de combustibles está determinado principalmente por este género.

En cuanto a la altura de la vegetación, en un bosque con alturas bajas un incendio superficial podría alcanzar las primeras ramas y tornarse a uno de copa, este paso sería menos probable en bosques con árboles de mayor altura (Juárez, 2002). En este estudio, es en el sitio 1 *Quercus* donde los árboles alcanzan en promedio alturas más bajas (7.4 cm en árboles con un DAP mayor a 30 cm), por lo que este lugar sería más susceptible de sufrir un incendio de copa. Sin embargo, esto no sólo depende de la altura de los árboles sino también de la composición de especies y su arquitectura, ya que algunos árboles pierden las ramas inferiores (auto aclareo) mientras que otros las conservan, incluso ramas muy bajas. Lo anterior revela que es fundamental conocer con detalle las especies y su arquitectura en los estudios relacionados con incendios. Referente al diámetro, Rodríguez (1996) y Juárez (2002) puntualizan que conforme más joven sea un árbol y más delgada sea su corteza, mayor será la probabilidad de que resulte afectado por el fuego. Ante esta situación el sitio 3 *Pinus-Quercus* con abundancia de árboles (227 individuos) de alturas y diámetros pequeños (de 2.6 a 5 cm), resulta ser más vulnerable a un incendio superficial donde se consuma por completo todo el combustible y cause daños severos a la vegetación presente, aún cuando el impacto del fuego en el árbol igualmente estará en función directa de la intensidad de las llamas.

Por otra parte, la variabilidad en la carga de combustibles en un determinado lugar no sólo depende del tipo de vegetación presente, sino también de las actividades que se desarrollen como son la recolección de leña, el saneamiento forestal, entre otros. Se conoce que las actividades de aprovechamiento forestal o actividades de saneamiento aportan grandes cargas de combustibles, principalmente de diámetros gruesos. En este caso, la máxima cantidad de combustibles mayor a 7.5 cm que predomina en cuatro de los sitios (3, 4, 6 y 7), puede ser debido a que son lugares donde prácticamente no se realiza la recolección de leña por lo que permanecen intactos sus combustibles. Es importante mencionar que en el sitio 6 *Pinus-Quercus* el 91% de los combustibles representado por la clase mayor a 7.5 cm ciertamente fue producto del saneamiento efectuado por la comunidad para erradicar la plaga del gusano descortezador (*Dendroctonus adjunctus* Blandford 1897), en el cual se tuvieron que eliminar todos los árboles infectados, dejando una gran acumulación de combustibles. Estos combustibles en particular favorecerán la intensidad del incendio una vez iniciado, pues tienen una mayor biomasa para la combustión. De acuerdo con Zapata (1990) en la mayoría de los casos, la acumulación de combustibles en sitios donde se desarrolle el aprovechamiento, representará un alto peligro potencial de incendio ya que se pueden alcanzar valores de 36 Mg ha⁻¹ o más. Debido a esto, los combustibles deben reducirse cuando alcanzan una carga capaz de sostener una intensidad calórica crítica, que provoque daños inaceptables a los árboles (Juárez, 2002). Otra de las razones de la acumulación de combustibles puede ser la ausencia de incendios, lo cual permite el incremento continuo de la carga.

Los sitios definidos por la capa de fermentación y hojarasca, presentan una alta probabilidad de ocurrencia de incendio, ya que las hojas planas y delgadas de los *Quercus* y las de *Pinus*, largas y delgadas, tienen una elevada relación superficie/volumen de contacto con las llamas, por ello arderán con facilidad. Cabe señalar que los combustibles ligeros como la hojarasca no sólo entran en ignición más fácilmente, sino que también arden muy deprisa y suelen consumirse casi por completo. La relación sup/vol. de los combustibles se ha reportado por otros autores. Porrero (2001) encontró que las ramillas de 1.3 cm de diámetro presentan una relación de 308 m²/m³, las acículas de pino de 5,600 m²/m³ y los pastos de 6000 m²/m³. En el presente trabajo los combustibles muestran el mismo comportamiento inverso de menor

diámetro mayor relación sup/vol. teniendo en la clase menores a 0.6 cm, una relación de 912.2 m²/m³ y en la clase de 0.6 a 2.5 cm, un promedio de 251.6 m²/m³. Debido a la alta relación sup/vol., los combustibles de diámetros pequeños tendrán una mayor superficie de intercambio de energía y humedad en relación con su volumen, lo que les hará perder con rapidez su contenido de humedad y calentarse con facilidad, por lo que estarán más disponibles para la combustión.

La heterogeneidad de las condiciones topográficas así como la carga de combustibles se vio reflejada en la mayoría de los sitios muestreados. Sin embargo resulta de interés que los sitios 3 y 7 de *Pinus-Quercus* separados entre sí a gran distancia dentro del municipio y en diferentes altitudes, mostraron resultados muy similares (ver cuadro 10). Ahora, si bien de acuerdo con Rodríguez (1996), aunque dos sitios presenten la misma vegetación y similar carga de combustibles, difícilmente el comportamiento de un incendio será semejante en ambos, debido a otros factores que determinan el comportamiento del fuego, tales como las condiciones atmosféricas, la topografía y la orientación de la ladera, entre otros. Por lo tanto en un caso de incendio en los sitios 3 y 7 el comportamiento puede ser totalmente distinto.

La accidentada topografía de Yavesía es un factor más que juega un papel fundamental en el peligro de incendio. Por ejemplo, la intensidad de la radiación solar estará en función de la topografía afectando la humedad de los combustibles ya que en superficies planas la intensidad de la radiación es mayor que en lugares donde las pendientes y la orientación de la ladera modifican su comportamiento (Countryman, 1978). En siete de los sitios, el 60% de los muestreos se realizaron en superficies cóncavas, por lo que se espera que la radiación en dichos sitios sea menor y que los combustibles estén más húmedos. Por otra parte, de acuerdo con García y García (1987), la orientación de las laderas es un factor climático ligado a la orografía y de gran influencia sobre los incendios forestales. Dado que los sitios 1 *Quercus* y 2 *Quercus-Pinus*, se localizan sobre laderas orientadas al sur, sus condiciones son más cálidas y presentan por tanto un mayor peligro de incendio. Lo contrario ocurre con los sitios 9 *Abies hickelii* y 10 *Pinus hartwegii*, orientados al norte y con bajas temperaturas, por lo que tienen menor probabilidad de incendiarse. Por lo anterior, la orientación es un factor que debe considerarse en las acciones de prevención y control de incendios. De acuerdo con Villers (2004) la

acumulación de combustibles está en función de la topografía del terreno ya que el peso del mantillo está relacionado con los perfiles transversal y longitudinal de la ladera, mientras que el material leñoso de 0 a 0.5 cm con la presencia de depresiones y cauces, al igual que con la clase de 0.6 a 2.5 cm. Aunque la topografía de Yavesía es compleja, y que siete sitios de muestreo se caracterizan por superficies cóncavas; la dispersión y acumulación de los combustibles se mostró de manera más uniforme en este estudio.

El conocimiento de las condiciones atmosféricas principalmente la temperatura y humedad relativa son de las herramientas indispensables en la evaluación del peligro de incendio. En el caso de Yavesía esto fue posible gracias a la información obtenida por las dos estaciones meteorológicas y los siete sensores atmosféricos (Hobo) distribuidos estratégicamente en el municipio. No obstante cuatro de los sitios (1, 3, 5 y 8) de muestreo carecieron de datos puntuales, lo cual se convierte en una limitación para llevar a cabo una mejor evaluación del peligro.

A pesar de que a nivel general varios de los sitios de muestreo descritos en el presente trabajo pertenecen al mismo tipo comunidad vegetal, los resultados muestran que existen diferencias significativas en las condiciones microclimáticas entre sitio, como lo describe García de Miranda (1988). Una de las razones es la cobertura vegetal de cada sitio, que genera condiciones ambientales distintas ya que con poca o nula cobertura se recibe por lo general mayor radiación solar incrementando la temperatura lo cual tiene un efecto significativo sobre el contenido de humedad de los combustibles tanto vivos como muertos (Countryman, 1978). Mucho se ha comentado que la variabilidad de las condiciones atmosféricas tiene una relación más estrecha con el comportamiento del fuego que los combustibles (Bessie y Johnson, 1995). La importancia del tiempo atmosférico no sólo radica en el comportamiento del fuego, sino que además actúa directamente sobre el contenido de humedad de los combustibles muertos en su disponibilidad de incendiarse (King y Linton, 1962). En este estudio no fue posible evaluar la humedad de los combustibles, sin embargo los datos de temperatura y humedad relativa contribuyeron no sólo a caracterizar los sitios con mayor probabilidad de incendio, sino también a determinar el horario de mayor peligro. Una herramienta metodológica que puede ser aplicada en posteriores estudios incluso con los datos obtenidos en este trabajo, son las tablas

publicadas por el Instituto de Conservación de la Naturaleza (ICONA), que incluyen la temperatura, humedad relativa del aire, mes de medición, exposición del combustible y del terreno así como la hora solar, que permiten calcular la humedad de los combustibles ligeros muertos (Porrero, 2001).

En cuanto a la metodología para cuantificar los combustibles leñosos, de acuerdo con Nájera y Hernández (2007) actualmente la técnica más difundida es precisamente la de intersecciones planares descrita por Brown (1974) ya que puede ser aplicada en cualquier tipo de bosque. Uno de los aspectos importantes de la técnica en comparación con otras, es la evaluación directa (*in situ*) de los combustibles forestales. No obstante es pertinente adecuar dicha técnica conforme a las condiciones de cada sitio como se efectuó en este estudio. Una de las modificaciones consistió en el número y tamaño de las líneas de muestreo estableciendo 30 líneas de 25 m cada una por sitio de muestreo. Como regla general se sugiere una cantidad de 15 a 20 líneas y una longitud determinada por la cantidad de combustibles disponibles, sin embargo las adecuaciones de la técnica para los bosques de Yavesía proporcionaron resultados confiables y precisos. Es primordial que la cantidad de líneas establecidas en cada muestreo sea la indicada con el fin de no sobrestimar la carga de combustibles.

Una gran cantidad de investigadores han empleado y modificado la técnica de intersecciones planares, obtenido buenos resultados. En el cuadro 15 se muestran, a manera de resumen, los resultados de distintos trabajos sobre la carga de combustibles leñosos y no leñosos, donde se aplicó dicha técnica. Varios de estos estudios presentan datos de bosques de coníferas (*Abies* y *Pinus*) y latifoliadas (*Quercus*), lo cual nos permite realizar una comparación entre las cargas reportadas por dichos autores y las obtenidas en este estudio. No obstante cabe recordar que existen otros factores que pueden alterar la cantidad de combustibles, como lo es el aprovechamiento forestal, entre otros, por lo que es indispensable conocer con exactitud las condiciones de cada área de estudio. Algunos de los resultados que se presentan en el cuadro 15, muestran por separado las distintas clases diamétricas de combustibles mientras que otros se agrupan en ligeros y pesados que corresponden a los leñosos. En este sentido se observa que en los trabajos de Miranda (2004) y Bautista *et al.* (2005) la carga de combustibles se agrupó solamente en las clases de ligeros y pesados. En ambos trabajos se muestra una diferencia muy

amplia en la carga, lo cual puede deberse a las características propias del sitio, como el tipo de vegetación, el aprovechamiento forestal, o posiblemente a diferencias en la metodología empleada. Los estudios que muestran una separación de la carga en las distintas categorías diamétricas son muy pocos, como el de Estrada y Ángeles (2007) cuyos resultados son muy similares a los obtenidos en este trabajo, con excepción de la clase menor a 0.6 cm. Otros autores reportan únicamente los intervalos de las cargas mínimas y máximas que presentan un amplio intervalo, como lo reportado en este trabajo, con una carga mínima desde 2.88 hasta 109.30 Mg ha⁻¹. Son pocos los trabajos en los cuales se evalúan los combustibles no leñosos, a pesar de ello, al comparar la carga de hojarasca del presente estudio con los de Nájera y Hernández (2007), y con los de Zapata (1990) se puede observar que los valores promedio de carga son similares, que van de 12.9 a 17.2 Mg ha⁻¹. No se encontraron trabajos donde se midiera la capa de fermentación lo que constituye un aporte del presente trabajo.

Cuadro 15. Comparación de carga de combustibles en Mg ha⁻¹.

Autor	Leñosos				No leñosos				** Riesgo	*** Peligro	Tipo de vegetación
	Ligeros (cm)			Pesados (cm)	Intervalo		Hojarasca	Capa de fermentación			
	< 0.6	0.6 - 2.5	2.6 - 7.5	> 7.5	mín.	máx.					
Zapata, 1990	---	---	---	---	15.49	71.71	---	17.24	alto	extremo	Bosques mixtos de <i>Pinus</i> y <i>Quercus</i>
* Flores y Benavides, 1994	---	---	---	---	13.00	53.00	---	---	alto	muy alto	---
Rodríguez y Sierra, 1995	---	---	---	---	7.98	64.26	---	---	alto	extremo	Zacatonal, matorral, bosques de <i>Quercus</i> , <i>Abies</i> y <i>Pinus</i>
* Alanis y Orozco, 2000	---	---	---	---	13.00	42.00	---	---	alto	alto	---
* Muñoz, 2001	---	---	---	---	16.00	37.00	---	---	alto	alto	---
Flores, 2004	7.41	2.08	10.09	---	---	---	---	---	---	---	Bosque de <i>Pinus</i> y <i>Quercus</i>
Miranda, 2004	---	9.70	---	0.59	1.98	17.00	---	---	medio	bajo	Matorral submontano, bosque de <i>Quercus</i> y bosque de <i>Pinus-Quercus</i>
Villers y López, 2004	3.96	5.80	1.72	---	---	---	---	---	---	---	Bosque de <i>Quercus</i> , <i>Pinus</i> y <i>Abies</i>
Bautista <i>et al.</i> , 2005	---	23.31	---	27.39	---	---	---	---	---	---	Bosques mixtos de <i>Pinus</i> y <i>Quercus</i>
Estrada y Ángeles, 2007	3.94	3.24	2.42	21.18	3.20	65.90	53.25	---	alto	extremo	Bosques mixtos de <i>Pinus</i> y <i>Quercus</i>
Nájera y Hernández, 2007	0.01	0.04	---	---	---	---	12.91	---	---	---	Bosque de <i>Pinus</i> spp.
Este estudio	0.34	2.49	3.60	35.73	2.88	109.30	14.67	25.43	alto	extremo	Bosques de <i>Quercus</i>, <i>Abies</i> y <i>Pinus</i>

* Citados por Estrada y Ángeles (2007).

** De acuerdo con Miranda (2004) menor a 15 Mg ha⁻¹ riesgo bajo, de 15 a 20 riesgo medio y mayor a 20 riesgo alto.

*** Grados establecido por Zapata (1990) de 0 a 21 ton ha⁻¹ peligro bajo, 22 a 35 moderado, 36 a 49 alto, 50 a 63 muy alto y mayor a 63 extremo.

Uno de los temas discutidos por los especialistas del fuego ha sido precisamente la falta de conjunción para establecer metodologías y términos homogéneos principalmente en el inventario de combustibles para los bosques de México. Un ejemplo de ello es la utilización de los términos riesgo y peligro de incendio, que en muchas ocasiones se plantean como sinónimos, no obstante en este estudio se evaluó el peligro considerando la definición descrita con anterioridad por Rodríguez (1996). A pesar de ello, resulta de interés hacer una comparación entre las categorías de riesgo establecidas por Miranda (2004) y las de peligro propuestas por Zapata (1990) que se muestran en el cuadro 15. El primero divide el riesgo en tres niveles: bajo, medio y alto de acuerdo a la carga de combustibles. Considerando esta clasificación, se observa que la mayoría de los trabajos coinciden con un nivel de riesgo alto, ya que el intervalo máximo está por arriba de los 20 Mg ha⁻¹, exceptuando el caso de Miranda (*op. cit.*) con un nivel medio de riesgo debido a la carga máxima de 17 Mg ha⁻¹. Ningún trabajo reportó un riesgo de incendio bajo, es decir con una carga menor a 15 Mg ha⁻¹. Aquí es importante señalar que sólo se hace una aproximación de los resultados reportados en este estudio con los niveles de riesgo, ya que para poder identificar las situaciones de riesgo es necesario considerar otros factores como las quemas agrícolas, hornos de carbón, maquinaria, líneas eléctricas, vías de comunicación, fogatas, entre otros.

Los factores que intervienen en la definición del grado de peligro son numerosos, básicamente se puede hablar de cuatro grupos: los factores atmosféricos, el tipo y cantidad de combustible, los factores causales y los topográficos (Santillán, 1993). Con este mismo enfoque se analizaron y discutieron los resultados del presente estudio, sin embargo no fue posible contar con los factores causales, que pueden ser considerados en posteriores trabajos. En cuanto a las distintas categorías de grado de peligro de incendio, en este estudio se utilizaron las propuestas por Zapata (1990) quien las determinó con base en la cantidad de combustibles muertos. Sin embargo en su clasificación sólo comprende los combustibles leñosos, excluyendo a la hojarasca y la capa de fermentación, ya que la carga y distribución de estos combustibles resultó ser muy uniforme en su estudio lo cual dificulta pasar de un rango de combustible a otro. En este caso, se consideraron las categorías de Zapata (*op. cit.*) ya que su trabajo se realizó en bosques mixtos de *Quercus* y *Pinus* con algunas especies en común con las de Yavesía,

además de que ambos trabajos se desarrollaron siguiendo la misma metodología de los combustibles. Bajo este escenario se determinaron los grados de peligro del presente estudio considerando igualmente sólo el material leñoso. Un aporte valioso del presente trabajo se debe a la inclusión del material no leñoso así como de las características topográficas y del tiempo atmosférico que permitieron identificar y describir con mejor precisión los sitios más vulnerables de peligro.

La elaboración de indicadores de peligro de incendio es una de las labores preventivas más importantes para el personal de combate de incendios y público en general. Aún cuando a nivel mundial ya se han generado sistemas adecuados del peligro de incendio, en México es necesario que se continúe trabajando en diversos sistemas que permitan implementar medidas más adecuadas en la planeación de prevención y combate de incendios (Rojo *et al.*, 2001). En los antecedentes descritos, se detallaron importantes trabajos que consideran como punto central el peligro de incendio, no obstante los índices fueron desarrollados a partir de metodologías distintas y estableciendo diferentes grados de peligro. Esto muestra la necesidad y el compromiso por parte de las dependencias del gobierno, instituciones académicas y centros de investigación, organizaciones no gubernamentales y otros organismos, de reunir y compartir las investigaciones sobre los incendios, con la finalidad de obtener metodologías e implementar medidas que permitan mejorar su estudio y fortalecer la prevención y el combate de incendios forestales.

VIII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los principales tipos de vegetación que conforman el municipio de Yavesía descritos en este estudio están dominados por los géneros *Quercus* (15 especies), *Pinus* (10 especies) y *Abies* con solo una especie. Se trata pues de un municipio con una riqueza de especies que deben ser consideradas en las actividades de prevención y combate de incendios ya que las propiedades en la composición de la madera determinarán el grado de ignitabilidad y por lo mismo un distinto comportamiento en los incendios.

Existe una alta complejidad tanto en la estructura vertical como en la diamétrica de los árboles en todos los sitios, con alturas desde 1.3 hasta 50 m, aunque estos últimos con bajos porcentajes, y especies con diámetros de juveniles a maduros. Esta variabilidad en la estructura demuestra una amplia diferenciación entre sitios y sobre todo en el aporte de combustibles forestales así como la respuesta a los efectos del fuego y su evolución.

Los bosques de Yavesía poseen una gran cantidad de combustibles forestales muertos. El aporte de carga en las distintas clases de combustibles, lo mismo que entre los sitios de estudios, fue muy variable, no obstante la mayor proporción de la carga estuvo determinada por la capa de fermentación y los combustibles con diámetros mayores a 7.5 cm. Lo anterior establece la posibilidad de incendios de gran intensidad. Las actividades del saneamiento forestal contribuyen de manera significativa en el incremento de la carga de combustibles.

A pesar de la gran variación en la carga de combustibles, la relación superficie/volumen resultó muy similar entre los sitios. Su importancia radica en el intercambio de energía y pérdida o ganancia humedad, lo cual determinará la disponibilidad para la combustión, por lo que los combustibles más pequeños arderán más fácilmente que los de diámetro mayor.

De manera general, la dispersión de los combustibles presenta una tendencia relativamente más uniforme en la mayoría de los sitios, es decir que se dispersan por todo el terreno, por lo tanto la propagación en caso de un incendio se desarrollará con facilidad. En el caso de los sitios 4 y 6 los combustibles agregados en forma de barreras dificultaran la propagación del fuego y su combate.

Yavesía se caracteriza por una accidentada topografía y variabilidad en las condiciones atmosféricas, factores esenciales en el estudio de los incendios forestales. Es un municipio con pendientes muy pronunciadas hasta sitios prácticamente en un plano horizontal, y con orientaciones principalmente de norte y sur, lo cual modifica no solo la distribución de los combustibles sino también su disponibilidad a incendiarse así como en el comportamiento del fuego una vez iniciado.

Los bosques de Yavesía presentan de manera general un grado bajo (sitios 1, 2, 8, 9 y 10) y extremo (sitios 3, 4, 6 y 7) de peligro de incendio, a excepción del sitio 5 con grado moderado. Prácticamente los sitios 9 y 10 son los sitios donde la ocurrencia de un incendio es poco probable, no sólo por su mínima carga de combustibles sino también por sus bajas temperaturas y elevados porcentajes de humedad. Es por ello que se deben emprender actividades de monitoreo continuo, así como labores de limpieza de combustibles principalmente en los sitios con grado extremo con la finalidad de evitar incendios de grandes dimensiones. Es recomendable realizar quemas prescritas para reducir la carga de combustibles, siempre y cuando se cuente con el apoyo de personal con experiencia, lo mismo que las brigadas contra incendios que guíen con precaución la quema y permitan obtener un buen resultado.

Se exhorta que en posteriores estudios del peligro de incendios, se tome en cuenta no sólo la carga de combustibles leñosos sino también el material no leñoso, las condiciones topográficas y atmosféricas como lo realizado en este estudio, para tener una mejor visión del potencial de peligro.

IX. LITERATURA CITADA

- Agee, J. 1993. Fire Ecology of Pacific Northwest Forests. Island Press. 493 p.
- Agee, J., L. Bradshaw, S. Gutsell, E. Heyerdahl, R. Keane, K. Lertzman y K. McKelvey. 1999. Links among fire effects, fuels, and climate. En: Assessing the effects of fire. Disturbance on ecosystems: A scientific agenda for research and management. Schmolz, D., D. Peterson, R. Keane, J. Lenihan, D. McKenzie, D. Weise y D. Sandberg. Portland Oregon, Pacific Northwest Research Station. 104 pp.
- Aguilar, A. 2007. Estructura del bosque templado en la comunidad de Santa María Yavesía, en la Sierra de Juárez, Oax; México. Tesis de Licenciatura en Biología. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Alvarado, E., J. Morfín, E. Jardel, R. Vihnanek, D. Wright, J. Michel, C. Wright, R. Ottmar, D. Sandberg y A. Nájera. 2008. Fotoseries para la cuantificación de combustibles forestales de México: bosques montanos subtropicales de la Sierra Madre del Sur y bosques templados y matorral submontano del norte de la Sierra Madre Oriental. University of Washington. College of Forest Resources. Pacific Wildland Fire, Sciences Laboratory. Special publication No. 1.
- Arnaldos, J., X. Navalón, E. Pastor, E. Planas y L. Zárate. 2004. Manual de ingeniería básica para la prevención y extinción de incendios forestales. Mundi-Prensa. Barcelona. 414 p.
- Arno, S y S. Allison-Bunnell. 2002. Flames in our forest. Disaster or renewal?. Island press. Washington. 227 p.
- Barajas, J., R. Echenique y T. Carmona. 1979. La madera y su uso en la construcción No. 3. Estructura e identificación. Instituto nacional de investigaciones sobre recursos bióticos. Laboratorio de Ciencia y Tecnología de la Madera.
- Bautista, J., E. Treviño, J. de J. Návar, O. Aguirre e I. Cantú. 2005. Caracterización de combustibles leñosos en el ejido Pueblo Nuevo, Durango. *Revista Chapingo. Serie de ciencias forestales y del ambiente*. Universidad Autónoma Chapingo. 11 (1): 51-56 pp.
- Bessie, W. y A. Johnson. 1995. The relative importance of fuels and weather on fire behavior in subalpine forests. *Ecology*, 76 (3): 747-762 pp.
- Benítez, E. 2006. Estructura, composición y diversidad β de los bosques de Santa María Yavesía, Oax. Tesis de Licenciatura en Biología. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, México.

- BOLFOR; Mostacedo, Bonifacio; Fredericksen, Todd S. 2000. Manual de Métodos Básicos de Muestreo y Análisis en Ecología Vegetal. Santa Cruz, Bolivia.
- Brown, J. 1974. Handbook for inventorying downed woody material. USDA Forest Service. General technical report, U.S. 24 pp.
- Brown, J., R. Oberheu y C. Johnston. 1982. Handbook for inventorying surface fuels and biomass in the interior west. USDA Forest Service. General technical report Int-129, U.S.
- Camacho, F. 2008. Propuesta para un plan de restauración de los bosques templados de Santa María Yavesía, Oaxaca, México, ante el ataque de *Dendroctonus adjunctus* Blandford 1897. Tesis de Maestría en Ciencias Biológicas. Biología Ambiental. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Cibrián, D., T. Méndez, R. Campos, B. Yates O. III y L. Flores. 1995. Insectos forestales de México. Universidad Autónoma Chapingo-Comisión Forestal de América del Norte. Publicación No. 6, 453 p.
- CONAFOR. Comisión Nacional Forestal. 2009. Incendios Forestales. [http://www.conafor.gob.mx/index.php?option=com_content&task=view&id=42&Itemid=31]
- Countryman, C. 1978. Radiation and wildland fire. Pacific Southwest Forest and Range Experimental Station. Forest Service. U.S. Department of Agriculture. Berkeley, California. 17 pp.
- DeBano, L. 1998. Fire's Effects on Ecosystems. John Wiley and Sons, Inc.
- Dentoni, M. y M. Muñoz. 2007. Sistemas de Evaluación de Peligro de Incendios. Plan Nacional de Manejo del Fuego Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable. 37 pp.
- Estrada, I y E. Ángeles. 2007. Evaluación de combustibles forestales en el Parque Nacional "El Chico", Hidalgo. Wildfire. 1-17 pp.
- FAO. 2006. Fire management-global assessment. FAO Forestry Paper 151.
- Flores, J. 2004. Simulación del comportamiento del fuego con base en la estimación geoestadística de la variación espacial de combustibles. En: Incendios forestales en México. Villers, L. y J. López. Cap. III. UNAM, Centro de Ciencias de la Atmósfera. 164 p.
- Flores, J. y P. Omi. 2003. Mapeo de combustibles forestales para simulaciones del comportamiento espacial del fuego usando estrategias de geomática. *Agrociencia*. 37 (1): 65-72 pp.

- Fosberg, M. 1977. Forecasting the 10-Hour timelag fuel moisture. Research paper RM-187. USDA Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station, Fort Collins, Colorado. 1-10.
- García de Miranda, E. 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). CETENAL. México, D.F.
- García de Pedraza, L. y M. García. 1987. La meteorología y los incendios forestales. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. 24 p.
- Garnica, J y P. Omi. 2002. Mapeo de combustibles forestales para la simulación del comportamiento espacial del fuego usando estrategias de geomática. *Agrociencia* (37): 65-72 pp.
- Juárez, A. 2002. Efecto de los incendios forestales en la regeneración natural de *Pinus oocarpa* var. *ochoterenai* Martínez. Tesis Ingeniero Forestal. División de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma Chapingo.
- King, A. y M. Linton. 1962. Moisture variation in forest fuels: the rate of response to climate changes. *Aust. J. Appl. Sci.* 14(1): 38-49 pp.
- Magaña, T. 1983. Determinación de un índice de peligro de incendios forestales para el municipio de Tlahuapan, Puebla. Tesis de Licenciatura. Departamento de Enseñanza, Investigación y Servicio en Bosques. Universidad Autónoma Chapingo.
- Magaña, V. 1999. El niño y los incendios forestales. En: Los impactos de El Niño en México. 229 p.
- Miranda, R. 2004. Determinación de las áreas de riesgo a incendios forestales del parque ecológico Chipinque, Nuevo León. En: Incendios forestales en México. Villers, L. y J. López. Cap. VI. Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Ciencias de la Atmósfera. 164 p.
- Myers, R. 2006. Convivir con el fuego. Manteniendo los ecosistemas y los medios de subsistencia mediante el Manejo Integral del Fuego. The Nature Conservancy. Iniciativa Global para el Manejo del Fuego.
- Nájera, J y E. Hernández. 2007. Estimación de la carga de combustibles forestales en un bosque coetáneo de la región de El Salto, Durango. *Tecnointelecto*. 4 (1): 28-31 pp.
- Navarrete, J. 2006. Estimación del contenido de carbono en la biomasa leñosa muerta para diferentes clases de cobertura vegetal y uso de suelo: el caso de la región Purépecha, Michoacán. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.

- Neri, P. 2004. Inflamabilidad relativa de combustibles en la estación forestal experimental Zoquiapan. Tesis de Ingeniero en Restauración Forestal. División de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma Chapingo.
- Porrero, M. 2001. Incendios forestales. Investigación de causas. Editorial Mundi-Prensa, Madrid, España.
- Ramírez, R., F. Ramos y A. Ríos. 2001. Estudio de ordenamiento territorial comunitario en Santa María Yavesía. Proyecto de desarrollo Sierra Norte de Oaxaca, A.C. WWF, México.
- Robles, F. y R. Echenique. 1983. Estructuras de madera. Editorial Limusa. México. 367 p.
- Rodríguez, D. 1996. Incendios forestales. Universidad Autónoma Chapingo. Editorial Mundi-Prensa, México. 630 p.
- Rodríguez, D. y P. Sierra. 1995. Evaluación de los combustibles forestales en los bosques del Distrito Federal. INIFAP. *Ciencia Forestal en México*. 20 (77): 193-218 pp.
- Rodríguez, D., M. Rodríguez, F. Fernández y S. Pyne. 2002. Educación e Incendios Forestales, Mundi-Prensa, México.
- Rojo, G., J. Santillán, H. Ramírez, B. Arteaga. 2001. Propuesta para determinar índices de peligro de incendio forestal en bosques de clima templado en México. *Revista Chapingo. Serie de ciencias forestales y del ambiente*. Universidad Autónoma Chapingo. 7 (1): 39-48 pp.
- Ryan, K. y S. Pickford. 1978. Physical properties of woody fuels in the blue mountains of Oregon and Washington. Usda Forest Service. Research Note 315. Pacific North West, Forest and Range Experiment Station. Portland, Oregon.
- Ruiz, J. 2000. El fuego, factor ecológico. En: La defensa contra los incendios forestales. Vélez, R. McGraw-Hill. España.
- Sackett, S. 1980. Woody fuel particle size and specific gravity of southwestern tree species. Usda Forest Service. Research Note 389. Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station, Fort Collins, Colorado.
- Sánchez, C y J. Zerecero. 1983. Método practico para calcular la cantidad de combustibles leñosos y hojarasca. Nota divulgativa No 9. CIFONOR-INIF, SFF. SARH. México. 11 p.
- Santillán, P. 1993. Propuesta de una metodología para la elaboración de un índice de peligro de incendio forestal. Pub. No. 3. Convenio México-Finlandia. DICIFO-UACH. 17 p.
- Simard, A. 1968. The moisture content of forest fuels – I. A review of the basic concepts. Forest Fire Research Institute, Ottawa, Ontario. 47 p.

- Spotimage. 2009. Características generales. Ficha técnica.
[<http://www.spotimage.com/web/es/316-satelites-spot.php>]
- Trejo, I. 2009. Tipos de vegetación y uso de suelo. En proceso.
- Van Wagner, C. 1982. Practical aspects of the line intersect method. Information Report PI-X-12. Petawawa National Forestry Institute. Canadian Forestry Service, Chalk River, Ontario, Canada.
- Vélez, R. 2000. La defensa contra los Incendios Forestales. Ed. McGraw-Hill, España.
- Villers, S. 2004. Modelos lineales generalizados: Una aplicación a la predicción de materiales combustibles en el parque nacional La Malinche, Puebla-Tlaxcala. Tesis de Licenciatura en Actuaría. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Villers, L y J. López. 2004. Comportamiento del fuego y evaluación del riesgo por incendios en las áreas forestales de México: un estudio en el volcán la Malinche. En: Incendios forestales en México. Métodos de evaluación. Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México, México. 164 p.
- Wackerly, D., W. Mendenhall III, R. Scheaffer. 2002. Estadística matemática con aplicaciones. Thomson, sexta edición. México. 854 p.
- Wayne, D. 1980. Bioestadística: base para el análisis de las ciencias de la salud. Limusa. México. 485 p.
- Wong, J. 2005. Humedad de los combustibles leñosos y su relación con variables atmosféricas. Su importancia en los incendios forestales, en el Parque Nacional Malinche, Tlaxcala. Tesis de Licenciatura en Biología. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Zapata, C. 1990. Determinación de indicadores de peligro potencial de incendios forestales con base en la cuantificación del material combustible. Seminario de Titulación. División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo, México.

Anexo 1. Valor de importancia relativa por especie en los sitios de muestreo.

Sitio 1.

Especie	N	Dens. Rel.	Frec.rel.	Dom. Rel.	VIR	%VIR
<i>Arbutus xalapensis</i>	40	5.2	16.4	1.5	23.1	7.7
<i>Arctostaphylos pungens</i>	23	3.0	10.9	0.1	14.0	4.7
<i>Cercocarpus macrophyllus</i>	11	1.4	5.5	0.7	7.6	2.5
<i>Litsea neesiana</i>	1	0.1	1.8	0.0	2.0	0.7
<i>Pinus lawsonii</i>	52	6.7	10.9	28.0	45.7	15.2
<i>Pinus oaxacana</i>	1	0.1	1.8	0.2	2.1	0.7
<i>Quercus acutifolia</i>	91	11.8	12.7	4.9	29.4	9.8
<i>Quercus aff. obtusata</i>	393	50.9	18.2	39.2	108.3	36.1
<i>Quercus castanea</i>	1	0.1	1.8	0.1	2.1	0.7
<i>Quercus laeta</i>	143	18.5	10.9	24.9	54.4	18.1
<i>Quercus obtusata</i>	13	1.7	5.5	0.2	7.4	2.5
<i>Quercus rugosa</i>	1	0.1	1.8	0.0	1.9	0.6
<i>Sambucus mexicana</i>	2	0.3	1.8	0.0	2.1	0.7
Total	772	100	100	100	300	100

Sitio 2.

Especie	N	Dens. Rel.	Frec.rel.	Dom. Rel.	VIR	%VIR
<i>Arbutus xalapensis</i>	25	5.4	12.5	2.5	20.4	6.8
<i>Arctostaphylos pungens</i>	43	9.3	8.9	2.0	20.2	6.7
<i>Pinus lawsonii</i>	80	17.2	16.1	29.1	62.5	20.8
<i>Pinus oaxacana</i>	33	7.1	12.5	22.0	41.6	13.9
<i>Pinus teocote</i>	28	6.0	5.4	3.1	14.5	4.8
<i>Quercus castanea</i>	86	18.5	17.9	14.0	50.4	16.8
<i>Quercus crassifolia</i>	51	11.0	12.5	7.8	31.3	10.4
<i>Quercus laeta</i>	118	25.4	14.3	19.4	59.1	19.7
Total	464	100	100	100	300	100

Sitio 3.

Especie	N	Dens. Rel.	Frec.rel.	Dom. Rel.	VIR	%VIR
<i>Alnus jorullensis</i>	1	0.1	2.4	0.1	2.7	0.9
<i>Arbutus xalapensis</i>	58	7.6	22.0	3.8	33.3	11.1
<i>Cercocarpus macrophyllus</i>	45	5.9	7.3	0.8	14.0	4.7
<i>Pinus oaxacana</i>	137	17.9	17.1	49.7	84.6	28.2
<i>Pinus patula</i> var. <i>longipedunculata</i>	239	31.2	17.1	15.8	64.0	21.3
<i>Quercus crassifolia</i>	7	0.9	4.9	0.9	6.7	2.2
<i>Quercus laurina</i>	6	0.8	4.9	1.0	6.6	2.2
<i>Quercus obtusata</i>	225	29.3	19.5	20.7	69.5	23.2
<i>Quercus sartorii</i>	49	6.4	4.9	7.3	18.5	6.2
Total	767	100	100	100	300	100

Continuación Anexo 1.

Sitio 4.

Espece	N	Den. Rel.	Frec.rel.	Dom. Rel.	VIR	%VIR
<i>Abies hickelii</i>	12	2.8	6.0	2.0	10.9	3.6
<i>Arbutus xalapensis</i>	4	0.9	2.4	0.1	3.5	1.2
<i>Cercocarpus macrophyllus</i>	1	0.2	1.2	0.1	1.5	0.5
<i>Cestrum laxum</i>	7	1.6	2.4	0.1	4.1	1.4
<i>Cornus disciflora</i>	1	0.2	1.2	0.1	1.5	0.5
<i>Fuchsia</i> sp.	1	0.2	1.2	0.0	1.4	0.5
<i>Litsea neesiana</i>	36	8.4	8.4	0.2	17.0	5.7
<i>Meliosma dentata</i>	2	0.5	1.2	0.1	1.7	0.6
<i>Nicotiana</i> sp.	1	0.2	1.2	0.0	1.4	0.5
<i>Pinus ayacahuite</i>	39	9.1	7.2	4.0	20.4	6.8
<i>Pinus montezumae</i>	104	24.3	12.0	32.4	68.8	22.9
<i>Pinus patula</i> var. <i>longipedunculata</i>	25	5.8	8.4	16.1	30.3	10.1
<i>Prunus serotina</i>	23	5.4	9.6	1.7	16.7	5.6
<i>Quercus acutifolia</i>	13	3.0	4.8	2.5	10.4	3.5
<i>Quercus conzattii</i>	74	17.3	12.0	15.1	44.4	14.8
<i>Quercus crassifolia</i>	1	0.2	1.2	0.5	1.9	0.6
<i>Quercus glabrescens</i>	17	4.0	7.2	0.5	11.7	3.9
<i>Quercus laurina</i>	67	15.7	12.0	24.6	52.3	17.4
Total	428	100	100	100	300	100

Sitio 5.

Espece	N	Dens. Rel.	Frec.rel.	Dom. Rel.	VIR	%VIR
<i>Alnus jorullensis</i>	34	4.7	5.4	2.0	12.1	4.0
<i>Arbutus xalapensis</i>	51	7.1	12.2	4.3	23.5	7.8
<i>Cercocarpus macrophyllus</i>	8	1.1	8.1	0.0	9.3	3.1
<i>Furcraea longaeva</i>	7	1.0	2.7	1.4	5.1	1.7
<i>Pinus ayacahuite</i>	5	0.7	2.7	1.7	5.1	1.7
<i>Pinus hartwegii</i>	22	3.1	8.1	11.0	22.2	7.4
<i>Pinus herrerae</i>	32	4.5	12.2	13.7	30.3	10.1
<i>Pinus patula</i> var. <i>longipedunculata</i>	279	39.0	13.5	37.0	89.5	29.8
<i>Prunus serotina</i>	2	0.3	2.7	0.0	3.0	1.0
<i>Quercus crassifolia</i>	44	6.1	9.5	5.7	21.3	7.1
<i>Quercus laurina</i>	25	3.5	9.5	0.5	13.5	4.5
<i>Quercus rugosa</i>	207	28.9	13.5	22.6	65.1	21.7
Total	716	100	100	100	300	100

Continuación Anexo 1.

Sitio 6.

Especie	N	Dens. Rel.	Frec.rel.	Dom. Rel.	VIR	%VIR
<i>Abies hickelii</i>	1	0.2	1.2	0.1	1.6	0.5
<i>Arbutus xalapensis</i>	14	2.7	9.9	1.8	14.3	4.8
<i>Cercocarpus macrophyllus</i>	1	0.2	1.2	0.0	1.5	0.5
<i>Clethra galeottiana</i>	1	0.2	1.2	0.1	1.6	0.5
<i>Garrya laurifolia</i>	5	1.0	6.2	0.5	7.6	2.5
<i>Litsea neesiana</i>	51	9.7	8.6	1.6	20.0	6.7
<i>Pinus ayacahuite</i>	70	13.4	11.1	37.5	62.0	20.7
<i>Pinus patula</i> var. <i>longipedunculata</i>	81	15.5	9.9	18.3	43.7	14.6
<i>Pinus pseudostrobus</i> var. <i>pseudostrobus</i>	20	3.8	8.6	8.6	21.1	7.0
<i>Prunus serotina</i>	26	5.0	7.4	1.5	13.8	4.6
<i>Quercus</i> aff. <i>castanea</i>	1	0.2	1.2	0.0	1.4	0.5
<i>Quercus affinis</i>	131	25.0	12.3	7.8	45.1	15.0
<i>Quercus glabrescens</i>	27	5.2	8.6	3.4	17.2	5.7
<i>Quercus rugosa</i>	95	18.1	12.3	18.7	49.2	16.4
Total	524	100	100	100	300	100

Sitio 7.

Especie	N	Dens. Rel.	Frec.rel.	Dom. Rel.	VIR	%VIR
<i>Abies hickelii</i>	80	19.9	16.3	24.7	61.0	20.3
<i>Arbutus xalapensis</i>	15	3.7	10.2	1.0	14.9	5.0
<i>Arctostaphylos pungens</i>	6	1.5	2.0	0.0	3.6	1.2
<i>Cercocarpus macrophyllus</i>	1	0.2	2.0	0.0	2.3	0.8
<i>Ficus</i> sp.	6	1.5	4.1	1.6	7.1	2.4
<i>Oreopanax xalapensis</i>	2	0.5	2.0	0.1	2.6	0.9
<i>Pinus ayacahuite</i>	141	35.1	20.4	41.9	97.4	32.5
<i>Pinus patula</i> var. <i>longipedunculata</i>	1	0.2	2.0	0.0	2.3	0.8
<i>Pinus pseudostrobus</i>	1	0.2	2.0	0.5	2.8	0.9
<i>Quercus acutifolia</i>	7	1.7	8.2	0.8	10.7	3.6
<i>Quercus</i> aff. <i>rubramenta</i>	15	3.7	2.0	0.3	6.1	2.0
<i>Quercus glabrescens</i>	48	11.9	6.1	9.7	27.8	9.3
<i>Quercus</i> sp.	75	18.7	16.3	19.0	54.0	18.0
<i>Sambucus mexicana</i>	4	1.0	6.1	0.3	7.4	2.5
Total	402	100	100	100	300	100

Continuación Anexo 1.

Sitio 8.

Especie	N	Dens. Rel.	Frec.rel.	Dom. Rel.	VIR	%VIR
<i>Abies hickelii</i>	148	25.5	12.9	22.7	61.0	20.3
<i>Arbutus xalapensis</i>	18	3.1	5.7	2.4	11.3	3.8
<i>Comarostaphylis discolor</i>	82	14.1	14.3	1.6	30.0	10.0
<i>Fuchsia</i> sp.	2	0.3	1.4	0.0	1.8	0.6
<i>Litsea neesiana</i>	35	6.0	10.0	0.8	16.8	5.6
<i>Pinus ayacahuite</i>	127	21.9	14.3	32.0	68.1	22.7
<i>Pinus hartwegii</i>	25	4.3	5.7	12.4	22.4	7.5
<i>Quercus acutifolia</i>	4	0.7	2.9	0.7	4.2	1.4
<i>Quercus affinis</i>	25	4.3	5.7	3.0	13.0	4.3
<i>Quercus crassifolia</i>	22	3.8	7.1	1.8	12.7	4.2
<i>Quercus glabrescens</i>	33	5.7	7.1	7.9	20.8	6.9
<i>Quercus laurina</i>	60	10.3	12.9	14.7	37.9	12.6
Total	581	100	100	100	300	

Sitio 9.

Especie	N	Dens. Rel.	Frec.rel.	Dom. Rel.	VIR	%VIR
<i>Abies hickelii</i>	695	74.6	27.0	65.4	167.0	55.7
<i>Arbutus xalapensis</i>	48	5.2	21.6	6.8	33.6	11.2
<i>Cercocarpus macrophyllus</i>	2	0.2	2.7	0.3	3.2	1.1
<i>Comarostaphylis discolor</i>	2	0.2	2.7	0.0	2.9	1.0
<i>Pinus ayacahuite</i>	14	1.5	8.1	3.2	12.8	4.3
<i>Pinus hartwegii</i>	164	17.6	27.0	23.2	67.9	22.6
<i>Quercus</i> sp.	7	0.8	10.8	1.1	12.7	4.2
Total	932	100	100	100	300	100

Sitio 10.

Especie	N	Dens. Rel.	Frec.rel.	Dom. Rel.	VIR	%VIR
<i>Abies hickelii</i>	3	0.4	15.4	0.2	16.0	5.3
<i>Arbutus xalapensis</i>	1	0.1	7.7	0.3	8.1	2.7
<i>Pinus hartwegii</i>	754	99.5	76.9	99.5	275.9	92.0
Total	758	100	100	100	300	100