

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
SISTEMA DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Variaciones en las propiedades físicas, químicas, mecánicas y
anatómicas de la madera de Teca (*Tectona grandis*) en Costa Rica,
causadas por el hongo *Rigidoporus* sp. (Basidiomicete)

Tesis sometida a la consideración de la Comisión del Programa de Estudios de
Postgrado de Biología para optar el título de Magister Scientiae.

ELIA MARTHA SARMIENTO SÁNCHEZ

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Costa Rica

2002

*Al que ha permitido que hasta
el día de hoy sea quien soy...*

AGRADECIMIENTO

A mi papá Porfirio Sarmiento y a mi mamá Teresa Sánchez por ser el móvil constante en cualquier actividad de superación que realizo.

Al Servicio Alemán de Intercambio Académico (DAAD), por cubrir en su totalidad los gastos que me permitieron la realización de mis estudios en la Universidad de Costa Rica.

A mi inolvidable pueblo hondureño, y a la Universidad Nacional Autónoma a la que debo mi formación profesional.

A todo el personal del Laboratorio de Productos Forestales y en especial a la Lic. Isabel Carpio, quien en el momento oportuno abrió las puertas del laboratorio y me brindó su ayuda.

A mi comité asesor, principalmente a la Dra. Julieta Carranza mi directora y amiga, por sus acertados consejos.

Agradecimiento especial a la prof. Lorena Blanco, quien sin conocerme estuvo siempre dispuesta a colaborar.

Al Dr. Walter Marín, por sus oportunas sugerencias.

A mi compañero y amigo Gustavo Adolfo Fontecha.

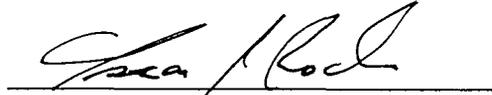
A mi paisano Benjamín Hernández, por su ayuda y apoyo desde el arribo a este país.

RECONOCIMIENTO

Deseo reconocer el aporte dado por varias instancias para el desarrollo y culminación de este proyecto.

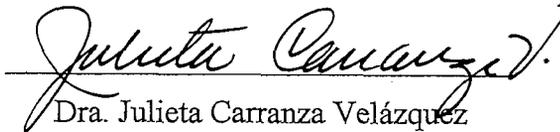
- Al Laboratorio de Productos Forestales de la Universidad de Costa Rica, que puso a mi disposición la planta física, reactivos, equipo y el apoyo técnico de todo su personal.
- A la Escuela de Biología de la Universidad de Costa Rica
- A la Empresa Forestal Flor y Fauna, que proporcionó la materia prima.
- A la Unidad de Microscopía Electrónica (UME), de la Universidad de Costa Rica.

“Esta tesis fue aceptada por la Comisión del Programa de Estudios de Postgrado en Biología de la Universidad de Costa Rica, como requisito parcial para optar al grado de Magister Scientiae”



Dr. Oscar Rocha Núñez

Representante de la decana del Sistema de Estudios de Posgrado.



Dra. Julieta Carranza Velázquez

DIRECTORA DE TESIS



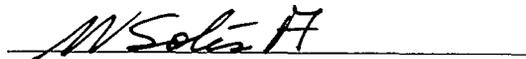
M Sc. María Lorena Blanco Rojas

ASESORA



Dr. Walter Marín Méndez

ASESOR



Dra. Virginia Solís Alvarado

DIRECTORA DEL PROGRAMA DE POSGRADO EN BIOLOGIA



Elia Martha Sarmiento Sánchez

CANDIDATA

Sarmiento Sánchez, Elia Martha

Variaciones en las propiedades físicas, químicas, mecánicas y anatómicas de la madera de Teca (*Tectona grandis*)

en Costa Rica, causadas por el hongo *Rigidoporus* sp. (Basidiomicete)

Maestría en Biología. – San José, C.R.:

E.M.Sarmiento S., 2003

72 h.: 45 il.- 70 refs.

RESUMEN

Se estudiaron las variaciones causadas por un hongo de podredumbre blanca (*Rigidoporus* sp.) en las propiedades físicas, químicas, mecánicas y anatómicas de la madera de albura y duramen de la teca (*Tectona grandis*) de dos edades de raleo, 6 y 10 años.

Las vías usadas por el hongo para penetrar e invadir el sustrato fueron las punteaduras y los elementos del vaso; el parénquima radial fue la primera estructura degradada por el hongo lo que provocó un desarreglo de las fibras adyacentes y por consiguiente una modificación de las propiedades de la madera.

Las mayores variaciones en las propiedades estudiadas se observaron en la albura de 6 años y las menores en el duramen de 10 años. Esta diferencia puede deberse a la cantidad de extractos presentes en el duramen que influyen en gran medida en la resistencia conferida a esta madera. La pérdida de masa, el daño en la pared celular y la pérdida de resistencia a la compresión, sobre todo en la madera de albura de 6 años, se puede relacionar con su mayor susceptibilidad al ataque biológico.

De acuerdo a los resultados obtenidos en los diferentes ensayos la madera de teca se puede clasificar como una madera altamente resistente al ataque del hongo utilizado.

PATOLOGÍA FORESTAL, PODREDUMBRE BLANCA, *Tectona grandis*,

Dra. Julieta Carranza

Escuela de Biología

ÍNDICE GENERAL

Contenido	Página
PORTADA	i
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTO	iii
RECONOCIMIENTO	iv
TRIBUNAL EXAMINADOR	v
RESUMEN	vi
INDICE DE FIGURAS	ix
INDICE DE CUADROS	xiv
INTRODUCCIÓN	1
Generalidades	1
Deforestación en Costa Rica	2
Características generales de la madera	4
Plantaciones forestales. Ventajas y desventajas	5
Resistencia natural	8
Tipos de podredumbre	8
Estudios relacionados con propiedades de la madera	12
Objetivos	15
MATERIALES Y MÉTODO	16
A. Obtención, preparación y caracterización de la madera	16
B. Preparación de las cámaras de podredumbre	18

Contenido	Página
C. Ensayos físicos	21
C.1 Densidad aparente	21
C.2 Pérdida de masa en base seca	21
D. Ensayo mecánico	22
D.1 Compresión paralela al grano	22
E. Ensayos químicos	22
E.1 Análisis de lignina insoluble en ácido	23
E.2 Análisis de solubles en NaOH al 1%	23
F. Ensayo anatómico	23
G. Análisis estadístico	25
RESULTADOS	
I. Ensayo anatómico	26
I.A. Características generales de la madera de teca (<i>Tectona grandis</i>)	26
I.B. Descripción	26
I.C. Proceso de infección	34
II. Ensayo físico	44
II.A. Características de la madera	44
II.B. Pérdidas de masa (base seca)	45
III. Ensayo mecánico	50
Compresión paralela al grano	50

Contenido	Página
IV. Ensayo químico	55
DISCUSIÓN	58
CONCLUSIONES	63
BIBLIOGRAFÍA	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Contenido	Página	
Figura 1	Localización geográfica de las plantaciones forestales de la empresa	
	Flor y Fauna.	17
Figura 2	Plantaciones de teca (<i>Tectona grandis</i>), ubicadas en la localidad de Aguas Zarcas, San Carlos, Provincia de Alajuela.	18
Figura 3	Número de muestra y distribución de especímenes en los diferentes ensayos.	20
Figura 4	Corte tangencial de madera de teca (20 X). La flecha señala el parénquima paratraqueal vasicéntrico.	27
Figura 5	Corte transversal (4 X) de madera de teca, (a) vasos múltiples, (b) rayo, (c) anillos de crecimiento.	27
Figura 6	Corte tangencial de madera de teca (20X), nótese la ubicación de los elementos de los vasos, (a) rayo, (b) elemento del vaso.	28
Figura 7	Corte transversal de madera de teca. Nótese los miembros de los vasos con placas perforadas simples.	28
Figura 8	Corte longitudinal de madera de teca, con placas perforadas ligeramente inclinadas.	29
Figura 9	Corte transversal de madera de teca, las flechas señalan los vasos con tílides.	29
Figura 10	Corte transversal de elemento de los vasos con puntuaciones simples y opuestas.	30

Contenido		Página
Figura 11	Corte longitudinal de elemento de los vasos, la flecha señala una punteadura rebordeada.	30
Figura 12	Corte tangencial (20 X) de madera de teca, la flecha señala células del parénquima radial.	31
Figura 13	Corte radial (10 X) de madera de teca, nótese la forma, tamaño y disposición de las células radiales.	31
Figura 14	Fibra libriforme.	32
Figura 15	Punteadura simple en fibra libriforme.	33
Figura 16	Hifa del hongo <i>Rigidoporus</i> sp. Las flechas muestran las fibulas.	34
Figura 17	Muestras de madera cubiertas de micelio.	35
Figura 18	Muestra de madera cubierto de micelio (a), (b) acercamiento de masa micelial.	35
Figura 19	Corte tangencial (20 X) de madera de teca después de 3 meses de exposición, nótese el parénquima radial degradado y los tejidos adyacentes sin daño aparente, (a) parénquima radial, (b) fibras.	36
Figura 20	Corte tangencial (10 X) de madera de teca después de 6 meses de exposición. Nótese el parénquima radial degradado.	37
Figura 21	Corte tangencial de madera de teca (4X) después de 3 meses de exposición al hongo, la flecha señala el desprendimiento de las fibras en el área atacada.	37
Figura 22	Corte tangencial (4 X) de madera de teca después de 6 meses de exposición, nótese el mayor desprendimiento de las fibras en el área dañada.	38

Contenido	Página	
Figura 23	Corte radial de madera de teca (20X), (a) elemento de los vasos, (b) hifas, (c) pared degradada.	38
Figura 24	Corte tangencial de madera de albura de teca (4X) después de 6 meses de exposición al hongo, las flechas señalan áreas totalmente dañadas.	39
Figura 25	Penetración de hifa por punteadura de elemento de los vasos.	39
Figura 26	Corte tangencial de madera de teca después de 3 meses de exposición. Nótese los tejidos internos inalterados, (a) fibras, (b) parénquima radial.	40
Figura 27	Corte longitudinal de vaso, (a) hifas, (b) pared de vaso.	40
Figura 28	Corte tangencial de elemento de los vasos en madera de albura de 6 años degradada, por el hongo después de 6 meses de exposición.	41
Figura 29	Borde de elemento de vaso en madera de teca de 6 años, después de 6 meses de exposición, nótese la ruptura de la pared.	41
Figura 30	Corte tangencial de duramen de 10 años, después de 6 meses de exposición, nótese las células parenquimatosas inalteradas.	42
Figura 31	Pared de vaso de teca, (a) hifa, (b) surco.	42
Figura 32	Pared de los elementos de los vasos agrietadas (a), hifa (b).	43
Figura 33	Pared de vaso con grietas.	43
Figura 34	Densidad de la madera de teca proveniente de las plantaciones de Flor y Fauna, albura de 6 años (A-6), duramen de 6 años (D-6), albura de 10 años (A-10), duramen de 10 años (D-10).	44

Contenido	Página	
Figura 35	Pérdida de masa (base seca) en la madera de albura de teca de 6 años, sometida al ataque del hongo <i>Rigidoporus</i> sp. durante 6 meses.	45
Figura 36	Pérdida de masa (base seca) en la madera de albura de teca de 10 años, sometida al ataque del hongo <i>Rigidoporus</i> sp. durante 6 meses.	46
Figura 37	Pérdida de masa (base seca) en la madera de duramen de teca de 6 años, sometida al ataque del hongo <i>Rigidoporus</i> sp. durante 6 meses.	46
Figura 38	Pérdida de masa (base seca) en la madera de duramen de teca de 10 años, sometida al ataque del hongo <i>Rigidoporus</i> sp. durante 6 meses.	47
Figura 39	Comparación entre las pérdidas de masa (base seca) de la madera de albura y duramen de teca de 6 y 10 años, sometidas al ataque del hongo <i>Rigidoporus</i> sp. durante 6 meses.	48
Figura 40.	Compresión paralela al grano de la madera de albura y duramen de teca de 6 y 10 años sin tratamiento biológico. Albura de 6 años (A-6-C), albura de 10 años (A-10-C), duramen de 6 años (D-6-C), duramen de 10 años (D-10-C).	50
Figura 41	Compresión paralela al grano de la madera de albura de teca de 6 años sometida al ataque de <i>Rigidoporus</i> sp. Albura de 6 años testigo (A-6-0), albura de 6 años después de 3 meses de exposición (A-6-3), albura de 6 años después 6 meses (A-6-6) de exposición.	51

Contenido	Página	
Figura 42	Compresión paralela al grano de la madera de albura de teca de 10 años sometida al ataque de <i>Rigidoporus</i> sp. Albura de 10 años testigo (A-10-0), albura de 10 años después de 3 meses de exposición (A-10-3), albura de 10 años después 6 meses (A-10-6) de exposición.	52
Figura 43	Compresión paralela al grano de la madera de duramen de teca de 6 años, sometida al ataque de <i>Rigidoporus</i> sp. Duramen de 6 años testigo (D-6-0), duramen de 6 años después de 3 meses de exposición (D-6-3) y duramen de 6 años después de 6 meses (D-6-6) de exposición.	53
Figura 44	Compresión paralela al grano de la madera de duramen de teca de 10 años, sometida al ataque de <i>Rigidoporus</i> sp. Duramen de 10 años, testigo (D-10-0), duramen de 10 años después de 3 meses de exposición (D-10-3) y duramen de 10 años después de 6 meses (D-10-6) de exposición.	54
Figura 45	Diferencia (valor relativo) de los solubles en NaOH al 1% entre el tercer y sexto mes de exposición, de la madera de teca. duramen de 10 años (D-10), duramen de 6 años (D-6), albura de 10 años (A-10), albura de 6 años (A-6).	56

ÍNDICE DE CUADROS

	Contenido	Página
Cuadro 1	Caracterización morfométrica de las fibras de teca para madera de 6 y 10 años de edad.	32
Cuadro 2	Comparación de medias (DMS) de las pérdidas de masa, de los diferentes tratamientos a los tres meses de infección. Albura de 6 años (A-6), duramen de 6 años (D-6), albura de 10 años (A-10), duramen de 10 años (D-10).	48
Cuadro 3	Comparación de medias (DMS) de las pérdidas de masa de los diferentes tratamientos a los 6 meses de infección. Albura de 6 años (A-6), duramen de 6 años(D-6), albura de 10 años (A-10), duramen de 10 años (D-10).	49
Cuadro 4	Comparación de medias (DMS) de la compresión paralela al grano de la madera de albura de teca de 6 años sometida al ataque de <i>Rigidoporus</i> sp. Testigo (A-6-0), tres meses de exposición (A-6-3), seis meses de exposición (A-6-6).	51
Cuadro 5	Comparación de medias (DMS) de la compresión paralela al grano de la madera de albura de teca de 10 años sometida al ataque de <i>Rigidoporus</i> sp. Testigo (A-10-0), tres meses de exposición (A-10-3), seis meses de exposición (A-10-6).	52

Contenido	Página
Cuadro 6 Comparación de medias (DMS) de la compresión paralela al grano de la madera de duramen de teca de 6 años sometida al ataque de <i>Rigidoporus</i> sp. Testigo (D-6-0), tres meses de exposición (D-6-3), seis meses de exposición (D-6-6).	53
Cuadro 7 Comparación de medias (DMS) de la compresión paralela al grano de la madera de duramen de teca de 10 años sometida al ataque de <i>Rigidoporus</i> sp. Testigo (D-10-0), tres meses de exposición (D-10-3), seis meses de exposición (D-10-6).	54
Cuadro 8 Solubilidad en NaOH al 1% (%) para la albura y el duramen de teca de 6 y 10 años, después de 3 y 6 meses de exposición al hongo <i>Rigidoporus</i> sp.	56
Cuadro 9 Contenido de lignina (%) para la albura y el duramen de teca de 6 y 10 años después de 3 y 6 meses de exposición al hongo <i>Rigidoporus</i> sp.	57

INTRODUCCIÓN

Generalidades:

La madera es un recurso natural renovable importante, tanto por su volumen como por el valor que se obtiene de ella como tal o de sus productos, ya sea por transformación química o mecánica (Carranza 1984, González e Icochea 1981). Consiste de una mezcla de celulosa, lignina y hemicelulosas, polímeros naturales que guardan una relación aproximada de 50:25:25, lo cual depende de la especie, de las variaciones biológicas, tales como las diferencias genéticas que puedan haber dentro de una especie y de las condiciones de crecimiento. La celulosa y las hemicelulosas son polímeros de hidratos de carbono formados a partir de moléculas de monosacáridos, y la lignina es un polímero de unidades fenilpropánicas (Goldstein 1979).

Además de los componentes poliméricos de la pared celular que constituyen la fracción principal de la madera, hay especies que contienen diversas cantidades y clases de materiales tales como: compuestos nitrogenados, pectina, almidón, azúcares de bajo peso molecular, minerales (Fe, Mg, Mn, etc.), terpenos, polifenoles y otros que se encuentran en cantidades variables (Kent 1973, Goldstein 1979).

Los componentes químicos de las paredes celulares del xilema secundario varían según la especie, o según el proceso de muerte celular. Este proceso puede culminar ya sea en la transformación de los componentes químicos o en la producción de extractos (gomas, resinas, taninos o inclusiones minerales) que se depositan en las paredes o en las cavidades celulares. Todos estos tipos de componentes químicos presentes en los elementos celulares

axiales y radiales influyen en las propiedades físicas y mecánicas de las paredes (Rivera *et al.* 1999).

Debido a las características tan particulares que presenta la madera, ésta se presta para un gran número de aplicaciones. Bueno (citado por González e Icochea 1981), indica que después de la Primera Guerra Mundial, se habían comunicado para la madera unos 2 000 usos; y que en nuestros días superan las 20 000 aplicaciones.

Es precisamente por esta versatilidad de la madera que su demanda ha aumentado mundialmente, con la consiguiente pérdida de la cobertura boscosa. En Centro América y en otras regiones del tercer mundo, la agricultura campesina migratoria, la explotación indiscriminada de los bosques y su conversión en pastos, la expansión de ciertos cultivos de agroexportación, el corte de leña y el rápido crecimiento de la población han ejercido un fuerte impacto sobre los bosques y han contribuido a una acelerada deforestación (Utting 1996).

Deforestación en Costa Rica:

En los últimos 40 años en Costa Rica se ha reducido notablemente la disponibilidad de madera proveniente de bosques naturales, esta pérdida acelerada motivó para que a partir de 1979 se incentivara el establecimiento de plantaciones forestales para poder abastecer la demanda de madera y recuperar terrenos degradados; el número de éstas ha ido en aumento y en 1992 ya alcanzaba un total de aproximadamente 84 000 hectáreas reforestadas (Arguedas 1996). Estas plantaciones forestales se han incorporado al desarrollo económico rural de Costa Rica en forma continua y creciente, mediante la inversión de recursos del sector privado, el uso de incentivos estatales y el pago de servicios ambientales. Durante la

última década fueron establecidas en el país más de 110 mil hectáreas de plantaciones con fines comerciales (Gómez *et al.* 1997, Araya 1998, Alfaro 1999).

Las oportunidades para la reforestación son muy amplias en Costa Rica dado que 1 734 490 hectáreas del territorio nacional (33,9%) califican para uso forestal (CCT 1993). Durante el período de 1979 a 1988 se sembraron, en promedio, 2 684 ha./año, que pasaron a 15 608 ha/ año entre 1989 y 1996. Entre las especies utilizadas se encuentran al menos 15, entre ellas: la melina (*Gmelina arborea*) 34%, el pochote (*Bombacopsis quinata*) 14,6%, el laurel (*Cordia alliodora*) 12%, la teca (*Tectona grandis*) 10,51%, la leucaena (*Leucaena leucocephala*) 6,97% y otras 21,68% (De Camino, 1998). La melina (*Gmelina arborea*) junto con la teca (*Tectona grandis*) forman parte de las especies utilizadas en más del 50% de las plantaciones forestales en el país (Sage y Quiros 2001).

La reforestación, como se puede notar, se ha realizado en su mayoría con especies exóticas (68%) seguida por especies nativas semidomesticadas (24%) y por último, con especies nativas en un porcentaje muy bajo (8%). Sin embargo, el uso de especies nativas y exóticas es igualmente riesgoso si no se cuenta con la adecuada información técnica. Aún así, éstas representan una alternativa para revegetar y agregar un valor a un terreno abandonado; aunque los beneficios que ofrecen no son equiparables a los del bosque natural (Calvo 1998).

La madera de teca (*Tectona grandis*), es una de las maderas tropicales más valiosas y mejor conocidas. El árbol ha sido plantado extensamente para la producción de madera utilizada en construcción naviera, muebles y carpintería en general (Weaver 1993, Carpio 1995). Es una especie caducifolia de tamaño grande, natural del Sudeste de Asia, Malasia e

Indochina, donde alcanza 45 m de altura y desarrolla un tronco con contrafuertes al llegar a la madurez (Weaver 1993).

En Centro América se cultiva en zonas bajas y húmedas y se destina para la producción de leña, postes y madera para construcción rural. Las razones para su uso generalizado son: un crecimiento relativamente rápido, su utilidad en la formación de cortinas rompevientos, cercas vivas y por la calidad de su madera (González *et al.* 1979, Chaves y Fonseca 1991).

La teca se introdujo por primera vez en la región del Caribe alrededor de 1880 a través de las jardines botánicos Reales en Trinidad, pero no se establecieron plantaciones en ese lugar hasta 1913, en el Neotrópico se ha plantado en Belice, Colombia, Costa Rica, Cuba, El Salvador, Nicaragua, Panamá, Honduras y otros países (Weaver 1993).

La mayoría de los patógenos de la teca han sido identificados en la India y el Lejano Oriente, con sólo unos cuantos registrados en plantaciones en África, América y en áreas lejos de su región nativa. A pesar de esto existe muy poca información de los efectos de los patógenos y de sus consecuencias económicas (Weaver 1993).

Características generales de la madera:

La disposición de las células en la madera está relacionada con la orientación predominantemente vertical y la simetría radial de los árboles. La madera es anisotrópica y tiene diferentes propiedades físicas en los tres ejes mayores (transversal, radial y tangencial); estas propiedades dependen del ángulo de orientación de las microfibrillas de celulosa en las paredes celulares, del número, tipo y distribución de las células presentes, del tipo y cantidad por volumen de material de la pared y de la composición proporcional de los constituyentes de la pared (Flores 1999).

Los elementos del xilema secundario se especializan en forma diversa para su función, estos son los elementos traqueales y las fibras, responsables del transporte de agua los primeros y del sostén los segundos, llegan a estar desprovistos de protoplastos antes de iniciar su contribución a la actividad fisiológica de la planta, (Esau 1976, Flores 1999).

En la madera de teca específicamente, el duramen comienza a formarse durante el sexto año (Ross 1958). La madera es moderadamente dura y pesada y es reconocida por su contracción poca y uniforme, la teca posee un peso específico promedio de 0,55 g por cm³. La madera se trabaja bien (Weaver 1993).

Los troncos de teca rebrotan al ser cortados o dañados y el crecimiento inicial es rápido (Ryan 1982), aunque esta tasa de crecimiento es muy acelerada, particularmente en las etapas tempranas de crecimiento tiene la desventaja de poder causar una disminución en la durabilidad de manera apreciable (Weaver 1993).

Plantaciones forestales. Ventajas y desventajas

Las plantaciones se inician cuando el bosque deja de ser un recurso infinito y la siembra de árboles ingresa a la categoría de cultivo.

Se caracterizan por la homogeneidad en cuanto al número de especies utilizadas y su edad, lo que representa una ventaja comercial pero a su vez se convierte en una desventaja desde el punto de vista biológico ya que favorece la aparición de plagas y enfermedades severas. En el caso de las enfermedades, la mayoría son causadas por hongos, principalmente de la clase deuteromicetes (hongos mitospóricos), seguido por los basidiomicetes (Arguedas 1996).

A pesar de las ventajas que posee la madera sobre otros materiales de construcción, diversas desventajas limitan su uso, una de las principales es su biodegradabilidad bajo

ciertas condiciones de uso (Gómez *et al.* 1969, Pérez *et al.* 1977, Sánchez 1980, González e Icochea 1981, Carranza 1984, Sarmiento y Vázquez 1984). Compuestos tales como la pectina, el almidón y los carbohidratos de bajo peso molecular, pueden ser importantes como fuentes iniciales de carbono para el establecimiento de microorganismos en la madera tanto de árboles vivos como cortados (Kent 1973).

Los trópicos ofrecen gran diversidad de especies maderables que son susceptibles al ataque de agentes externos, entre los cuales se encuentran los hongos xilófagos. Pérez *et al.* (citados por Sarmiento y Vázquez 1984) mencionan que en las regiones con climas tropicales, la madera es más propensa a sufrir daños por la proliferación de estos organismos, los cuales son capaces de deteriorar las paredes celulares y causar cambios físicos y químicos en las maderas, cambios que comúnmente se conocen como “pudriciones” (Gómez *et al.* 1969). El proceso de podredumbre de la madera es altamente variable y depende del organismo descomponedor, la especie de planta y del microhabitat dentro del sustrato (Alexopoulos *et al.* 1996).

Estos hongos descomponedores constituyen un factor muy importante en el manejo de maderas comerciales, ya que al presentar éstas condiciones de humedad apropiadas para el crecimiento de hongos, estos se establecen en los tejidos vegetales muertos y los degradan al alimentarse de sus sustancias orgánicas (Sánchez 1980, Wolf y Perales 1985).

Los cambios morfológicos que ocurren en la madera durante la descomposición microbial han recibido una atención especial debido a su importancia económica (Liese 1970).

Las grandes pérdidas ya sea de madera procedente de árboles vivos, de árboles cortados o de productos que se obtienen de ella, se deben principalmente a los hongos

basidiomicetes. La mayor parte de la podredumbre en los árboles vivos se limita al tejido leñoso central maduro de las raíces, tallos o ramas, denominado duramen. Sin embargo, una vez que se corta el árbol, la madera externa, que se denomina albura, es también atacada por los hongos de podredumbre de la madera, así como lo son los productos de madera fabricados a partir de ella (Agrios 1996). Muchas de las diferencias entre la albura y el duramen son de índole química. Con el tiempo, las células del duramen pierden agua y sustancias alimenticias almacenadas y se infiltran sustancias orgánicas distintas, tales como aceites, resinas, taninos, colorantes y sustancias aromáticas y las células parenquimatosas mueren; esta etapa va precedida de una serie de cambios en el leño que distinguen la albura activa del duramen inactivo

El duramen de muchas especies de árboles contiene compuestos fenólicos que inhiben la podredumbre y son en gran parte responsables de la durabilidad del duramen en productos elaborados; la albura de la mayoría de las especies carece de cantidades apreciables de estos y por lo tanto es menos duradera en servicio que el duramen cuando está expuesta a condiciones que favorecen la podredumbre (Shain 1979).

Aunque todas las maderas están sujetas a la biodegradación, algunas son más vulnerables que otras; las maderas más durables deben su resistencia principalmente a los compuestos inhibitorios (extractos) producidos antes de la infección cuando la albura es transformada en duramen o en respuesta al daño o invasión patogénica, estos compuestos actúan como preservantes naturales (Scheffer 1973, Hart y Shrimptom 1978, Shain 1979, Canessa 1988).

Resistencia natural:

La resistencia natural de la madera depende de las propiedades intrínsecas de este material y su conocimiento es básico para el mejor aprovechamiento de las especies forestales (González e Icochea 1981, Wolf y Perales 1985). La importancia de la durabilidad reside en que ésta determina el tiempo durante el cual se mantienen vigentes las propiedades físicas y mecánicas de la madera, lo que permite determinar su mejor aprovechamiento en forma natural o recomendar la técnica y el nivel de preservación que debe aplicarse a las especies que lo requieran (Escuza y Trujillo 1989).

Tipos de podredumbre:

Al inicio del proceso de podredumbre ocurre una degradación por bacterias, luego algunos ascomicetes invaden la madera y por último los organismos descomponedores más agresivos (otros ascomicetes y basidiomicetes) aceleran el proceso de degradación.

Se han reconocido tres tipos de podredumbre: café, blanca y suave; las dos primeras son causadas principalmente por basidiomicetes, mientras que la tercera es causada por numerosos miembros de hongos mitospóricos y ascomicetes (Alexopoulos *et al.* 1996). Esta distinción se ha basado en diferencias aparentes en los mecanismos de degradación entre los tres tipos de podredumbres; en la actualidad se sabe que también son fundamentales los cambios químicos en la madera y los tipos de hongos que intervienen en el proceso (Darrel 1973, Dobry *et al.* 1986).

El cuerpo vegetativo de los hongos, formado por hifas, produce enzimas extracelulares que descomponen la madera. El tipo de enzima producido por éste determinará cual componente (celulosa, hemicelulosa, lignina) será degradado y por ende cual clase de podredumbre se presentará (Blanchette 1980, Alexopoulos *et al.* 1996).

En el caso de la podredumbre café sólo son removidas porciones de carbohidratos y el resto de la madera se vuelve cada vez más alto en lignina, la madera adquiere un color café, tiende a rajarse a través del grano, a colapsarse y a encogerse anormalmente. En una podredumbre blanca típica, tanto la lignina como la celulosa son removidas y la madera tiende a perder el color (Gómez *et al.* 1969, Liese 1970, Darrel 1973, Sánchez 1980, Agrios 1996, Rodríguez 1998). En la podredumbre suave son removidas principalmente, la celulosa y la hemicelulosa, y a menor velocidad la lignina (Darrel 1973); la diferencia con la podredumbre blanca se basa específicamente en el modo de penetración hifal, ya que en la podredumbre suave la hifa crece dentro de la pared celular, a diferencia de la podredumbre blanca y café, donde la hifa se desarrolla dentro del lumen de la célula (Liese 1970).

Los hongos de podredumbre blanca son por lo tanto, los únicos capaces de sintetizar un complejo enzimático que puede degradar la lignina y alterar de este modo la estructura celular; asimismo, remueven eventualmente la celulosa y la hemicelulosa lo que da a la madera una apariencia blanquecina debido a la deposición de sustancias degradadas (Lavagni 1982).

Los basidiomicetes de suelo son los más importantes en el reciclaje de carbono acumulado en la madera, algunos de ellos causan podredumbre blanca y son especialmente importantes en los ecosistemas boscosos, ya que son los únicos capaces de degradar todos los compuestos celulares (celulosa, hemicelulosa y lignina) de la madera (Otjen y Blanchette 1986).

Los hongos de podredumbre blanca están representados por todos los principales grupos de Basidiomicetes y algunos Ascomicetes, como Xilariales. La proporción relativa de

degradación de lignina, celulosa y otros constituyentes de la pared celular, difiere algunas veces, ya que depende de la especie del hongo y de las condiciones que prevalecen en la madera. Con base en lo anterior, se ha clasificado esta podredumbre en dos formas: deslignificación selectiva y podredumbre simultánea (Schwarze *et al.* 2000).

En el primer caso los hongos penetran, colonizan las células y secretan enzimas degradadoras que se difunden a través de las capas de la pared celular, la lignina es removida primero y la celulosa y hemicelulosa son degradadas luego. Esta característica tan peculiar en la degradación de los componentes celulares ha despertado un creciente interés en estos hongos, debido a su gran potencial para ser utilizados en sistemas biolignolíticos, como son la conversión de lignocelulosa en alimento para animales (rumiantes), la obtención de productos celulósicos (biopulpeo), y la fermentación para la producción de etanol (Blanchette 1984, Otjen y Blanchette 1986, Sachs *et al.* 1990). En el caso de la podredumbre simultánea la lignina, celulosa y hemicelulosas son degradadas aproximadamente en igual proporción. Investigaciones recientes sugieren que algunos hongos de podredumbre blanca son capaces de cambiar de un sistema de degradación selectiva a uno de degradación simultánea. Esta capacidad de causar dos tipos micromorfológicamente distintos de degradación en la pared celular abre una posibilidad interesante para la utilización de estos hongos la cual debe de ser más estudiada (Otjen y Blanchette 1986, Alexopoulos *et al.* 1996, Schwarze *et al.* 2000).

La mayor parte de la información de los mecanismos de degradación de la lignina, se ha obtenido de estudios con hongos de podredumbre blanca (Szklarz y Antibus 1989). Sin embargo, otros microorganismos tales como ascomicetes y algunas bacterias, están involucrados en los procesos de descomposición de lignina (Rodríguez *et al.* 1997).

De los 3 tipos principales de hongos causantes de podredumbre de madera los menos estudiados han sido los de podredumbre suave. Estudios llevados a cabo hasta los años setenta, se limitaban a los efectos químicos de este grupo de hongos en la madera, en particular, los causados por *Chaetomium globosum* en madera de haya (*Fagus sylvatica*) (Darrel 1973, Esllyn *et al.* 1975). Posteriormente, se han realizado estudios sobre la producción de peroxidases y se han caracterizado los mecanismos de degradación de lignina utilizados por el hongo ascomycete *Chrysonilia sitophila* (Rodríguez *et al.* 1997).

Estudios relacionados con propiedades de la madera:

Se han llevado a cabo varios estudios sobre biodegradación de la madera por hongos xilófagos en zonas tropicales. Entre ellos se pueden mencionar los de: Herrera y colaboradores (sin año), sobre la durabilidad natural de la madera de 15 especies forestales mexicanas. Asimismo, Gómez *et al.* (1969), estudiaron la resistencia de 11 especies forestales mexicanas a la podredumbre (pérdidas de peso / albura y duramen). En ambos estudios se utilizaron hongos basidiomicetes (*Polyporus sanguineus*, *Lentinus lepideus*, *Poria monticola* y *Stereum sanguinolentum*) y las maderas fueron clasificadas desde no resistentes hasta altamente resistentes según las pérdidas de peso obtenidas.

Otros estudios relacionados con durabilidad, pero con especies no forestales incluyen el de Wolf y Perales (1985) quienes analizaron la durabilidad natural (pérdida de peso) de la madera de algunas especies del matorral del noreste de México. De acuerdo a sus resultados, las especies fueron clasificadas desde altamente durables hasta no durables, en esta última categoría se ubicaron la mayoría de las especies.

Donoso y Veloso (1968), estudiaron la durabilidad natural de la madera de algunas especies forestales de interés comercial en Chile. En su estudio concluyen que la madera proveniente del duramen, es más resistente al ataque fungoso que aquella de albura pero que no se puede correlacionar claramente la densidad de la madera con su durabilidad natural ya que la misma presenta en algunos casos fuertes variaciones según sea su procedencia.

González e Icochea (1981) estudiaron la podredumbre de la madera de 10 especies forestales por acción de 5 hongos en Perú. De acuerdo a sus resultados, el manto micelial superficial no constituyó un índice del grado de destrucción que ocasionaban estos hongos en la madera.

Escuza y Trujillo (1989) estudiaron la durabilidad natural de cinco especies forestales de la Amazonía Peruana ante el ataque de los hongos *Ganoderma applanatum*, *Polyporus sanguineus* y *Lenzites trabea*. Sus resultados demostraron que el porcentaje de extractos en la madera de las especies estudiadas mostraba una alta correlación con la resistencia a la pudrición.

Muchos de los estudios de podredumbre realizados en países tropicales están dirigidos principalmente a la identificación de basidiomicetes patógenos en diferentes hospederos. Algunas de estas investigaciones son las realizadas en Venezuela por Bracamonte *et al.* (1996), Bracamonte *et al.* (1998), Mavillo y Holmquist (1995), Holmquist (1990), y la llevada a cabo en México por Sánchez (1980). Asimismo, Sarmiento y Vázquez (1984) en Perú, estudiaron la incidencia de hongos xilófagos en estacas de especies forestales tropicales, incluida la teca. Este trabajo se basó en observaciones macroscópicas de los hongos que se presentaron en las estacas y su época de fructificación. Carranza (1991, 1992, 1993 y 1996), Ruiz y Carranza (1996), Carranza y Ryvardeen (1998) y Ruiz (1998), han estudiado la taxonomía y distribución de los hongos poriales, principales descomponedores de la madera en Costa Rica. Asimismo, Lavagni (1982) aisló e identificó algunos hongos entre ellos poriales, provenientes de estacas de maderas tropicales tratadas con un preservante.

Sin embargo, son pocos los estudios relacionados con las variaciones en las propiedades físicas, químicas, anatómicas y mecánicas de la madera debidas al efecto causado por hongos xilófagos. Algunos de estos estudios son los llevados a cabo por Rodríguez (1979) quien realizó pruebas de resistencia a la podredumbre en laurel (*Cordia alliodora*) y jaúl (*Alnus acuminata*) sometidas al ataque de dos hongos de pudrición; sin embargo, el único estudio realizado en maderas de plantación es el de Canessa (1988) donde se estudió la resistencia a la podredumbre de seis especies maderables, incluida la teca, la cual demostró ser la especie más resistente a la podredumbre, tanto para la madera de albura como para la del duramen. Las pérdidas de masa en ese estudio fueron de 6.83% a 13.68% para la madera de albura y de 2.62% a 8.54% para la madera de duramen

Hut y Garrat, (citados por Escuza y Trujillo 1989) y Donoso y Veloso (1968) sostienen que la durabilidad natural de la madera representa la resistencia de ésta a los agentes bióticos (hongos, insectos, barrenadores marinos) y abióticos (clima, fuego) que causan su alteración. La durabilidad natural determina el tiempo en que se mantienen las propiedades físicas y mecánicas de la madera. La acción de los hongos es preponderante sobre los demás agentes de destrucción; de ahí que se ha acordado internacionalmente referir la durabilidad natural a la acción de éstos.

Debido a la importancia que ha adquirido la madera proveniente de plantaciones forestales, sobre todo aquellas especies que se cultivan en mayor grado y al poco conocimiento que se tiene de los patógenos que las atacan, se planteó el presente trabajo con los siguientes objetivos:

A.- Objetivo general:

- Determinar las variaciones en las propiedades físicas, químicas, mecánicas y anatómicas de la albura y el duramen de teca (*Tectona grandis*), ocasionadas por el ataque de un hongo de podredumbre blanca.

B.- Objetivos específicos:

- Determinar la durabilidad de la madera, mediante pruebas que permitan calcular las pérdidas de masa (en base seca) por podredumbre.
- Determinar las variaciones en el contenido de lignina, en los solubles en NaOH al 1% y en la propiedad mecánica compresión paralela al grano en la madera de teca, ocasionadas por el hongo inoculado.
- Describir y evaluar los cambios morfológicos ocasionados por el hongo en las paredes de las células de la madera.
- Comparar la resistencia del duramen y de la albura proveniente de árboles de dos edades de raleo.
- Describir la madera de la teca (*Tectona grandis*), en cuanto a su anatomía, sus contenidos químicos y sus propiedades físicas y mecánicas.

MATERIALES Y MÉTODO

A. Obtención, preparación y caracterización de la madera

La madera de teca (*Tectona grandis*) utilizada en este estudio se obtuvo de las plantaciones de la empresa Flor y Fauna S.A, ubicadas en Aguas Zarcas, San Carlos, Provincia de Alajuela, entre las coordenadas: 10°, 34', 36'' latitud norte, 84°, 23', 17'' longitud oeste, 10°, 34', 36'' latitud norte, 84°, 21', 38'' longitud oeste y 10°, 34', 3'' latitud norte, 84°, 23', 17'' longitud oeste, 10°, 34', 3'' latitud norte, 84°, 21', 38'' longitud oeste, (Figs. 1 y 2) en edades de raleo de 6 y 10 años.

Las muestras de madera para los ensayos anatómicos, mecánicos y físicos y el aserrín para los ensayos químicos, fueron preparadas en las instalaciones de la compañía forestal. Las pruebas se llevaron a cabo en el Laboratorio de Productos Forestales de Universidad de Costa Rica y en la Escuela de Biología.

Los cubos de madera se cortaron en las dimensiones requeridas para cada ensayo: 2,5 cm x 2,5 cm x 1 cm para determinar la pérdida de masa y 2,5 cm x 2,5 cm x 10 cm para el ensayo de compresión paralela al grano; en ambos casos se obtuvieron muestras de madera de albura y duramen. Los especímenes de ensayo se mantuvieron en un cuarto con condiciones controladas, a $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $50\% \pm 2\%$ de humedad relativa hasta su procesamiento.



Fig. 1. Localización geográfica de las plantaciones forestales de la empresa Flor y Fauna.

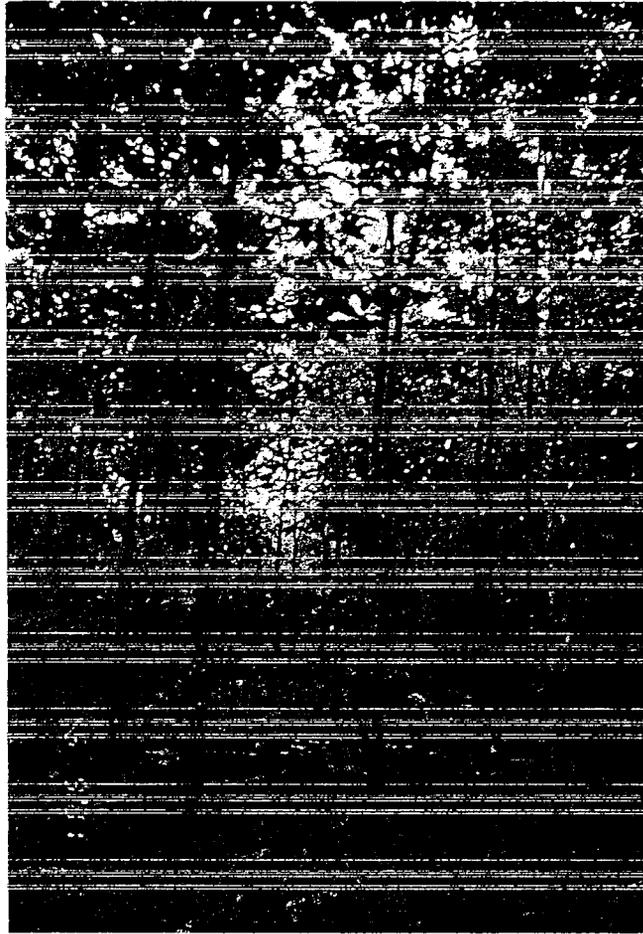


Fig. 2. Plantaciones de teca (*Tectona grandis*), ubicadas en la localidad de Aguas Zarcas, San Carlos, Provincia de Alajuela.

B. Preparación de las cámaras de podredumbre

En este estudio se empleó el hongo *Rigidoporus* sp., causante de podredumbre blanca, el cual fue aislado de tocones de teca, en la citada plantación.

Las cámaras de pudrición se prepararon en botellas de vidrio cuadradas de 250 ml de capacidad, a las cuales se les agregó 20 ml de medio de cultivo malta-agar (2%) y se

esterilizaron en autoclave durante 15 minutos a 121 °C y 15 libras de presión. Una vez autoclavadas se colocaron en posición horizontal hasta la completa solidificación del medio, se inocularon con cultivos puros del hongo seleccionado y se incubaron en la oscuridad a 27 °C durante dos semanas para que el hongo se extendiera sobre el medio de cultivo.

Los bloques de madera se pesaron para determinar su masa (base seca), se saturaron al vacío y se esterilizaron. Una vez esterilizados se colocaron dentro de las botellas inoculadas, sobre una base de varilla de vidrio en forma de “V”, para evitar el contacto directo con el medio. Se colocó un tapón de algodón debajo de la tapa para facilitar la entrada de aire.

Se montaron 262 botellas, 198 con tres muestras de madera cada una y 64 con solo una (para el ensayo mecánico). Todas las botellas se colocaron en una incubadora a 27 °C en la oscuridad durante 6 meses.

Se extrajeron mensualmente 15 muestras de madera para el ensayo físico (pérdida de masa, base seca) por tratamiento (edad, albura/duramen); así mismo cada tres meses se extrajeron 28 muestras de madera para el ensayo químico (contenido de solubles en NaOH al 1% y lignina Klason), 8 muestras para el ensayo mecánico (compresión paralela al grano) y 1 para el ensayo anatómico. En todos los casos se les removió el micelio y se secaron (para detener el crecimiento del hongo) para realizar cada ensayo (Fig. 3).

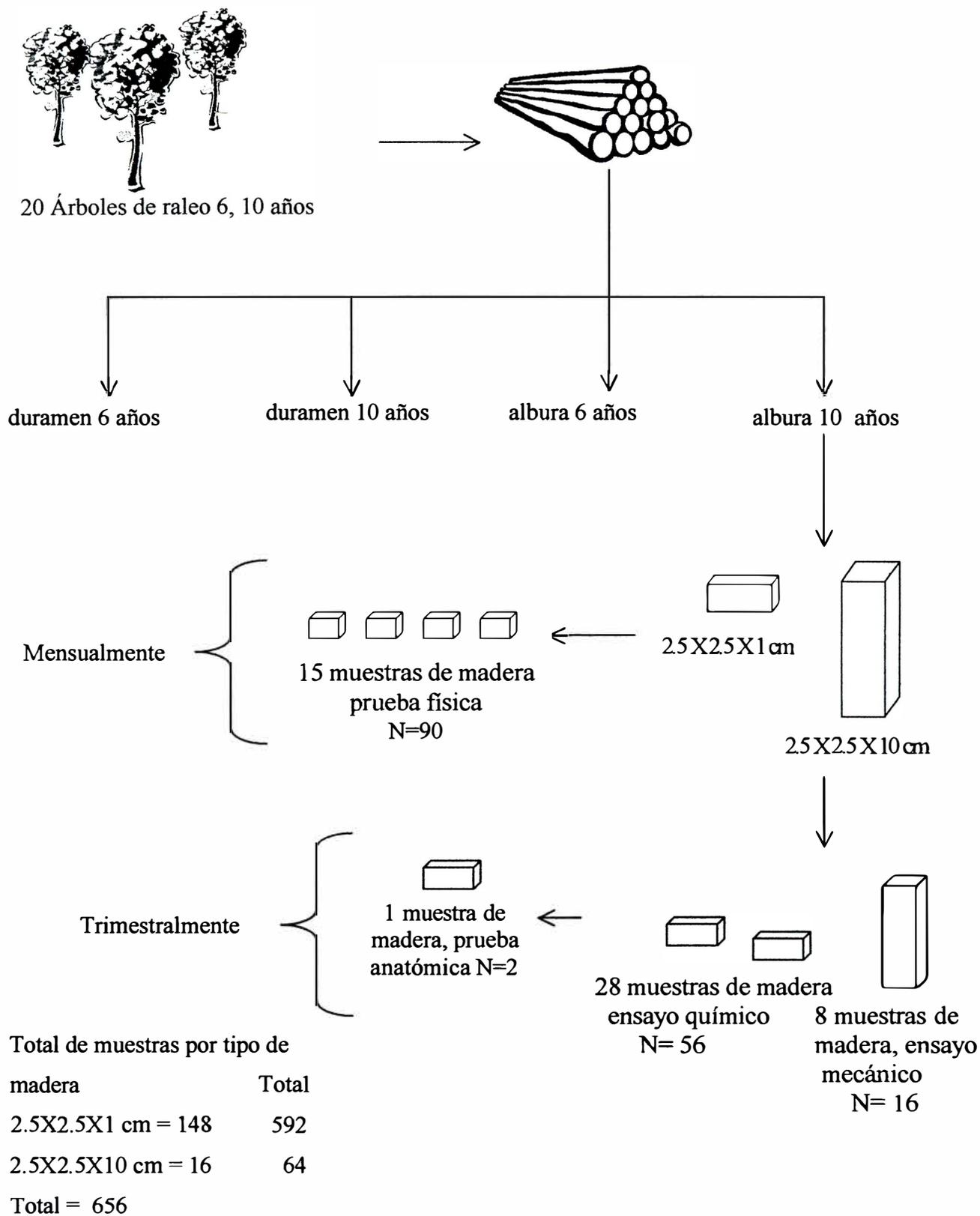


Fig. 3. Número de muestra y distribución de los especímenes de ensayo

C. Ensayo físico

C.1. Densidad aparente

La densidad se obtuvo de las muestras de madera de 2,5 cm x 2,5 cm x 10 cm que fueron utilizadas en el ensayo de prueba mecánica (64 por tratamiento) según la norma ASTM, designación: D 2395 – 92. (Obtención de densidad mediante medidas).

C. 2 Pérdida de masa (base seca):

Este ensayo se realizó cada mes y permitió conocer la pérdida de masa de la madera originada por la actividad de los hongos, las pérdidas se expresaron en porcentajes con respecto a la masa seca original de los bloques. Se extrajeron 15 muestras por mes, a las que se les removió el micelio y se secaron al horno a $103\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta alcanzar masa constante (aprox. 24 horas). La diferencia entre la masa inicial y la masa final (después de exposición al hongo) representó la pérdida de masa seca en cada cubo.

$$F_2 = \frac{(M_1 - M_2) 100}{M_1}$$

Donde:

F_2 = Pérdida de masa causada por un hongo en una muestra de madera.

M_1 = Media aritmética inicial de la masa de las muestras de madera antes de someterlas al ataque por un hongo.

M_2 = Media aritmética final de la masa de las muestras de madera después de someterlas al ataque por un hongo.

D. Ensayo mecánico

Compresión paralela al grano:

Especímenes de todos los tratamientos se utilizaron en este ensayo (albura y duramen de 6 y 10 años). Se extrajeron 8 muestras de madera de cada tratamiento (dimensión especial) trimestralmente, se les removió el micelio y se secaron al horno a $103\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 24 horas.

Se determinó el máximo esfuerzo soportado por el espécimen sometido a compresión. La carga se aplicó por medio de una placa que actuó en toda el área de la sección paralelamente al grano de la madera. Hasta deformar la madera y fallarla.

Las fuerzas aplicadas oscilaron en un ámbito de 6 000 Kgf. con valor de división de 10 Kgf. a una velocidad de carga de 0,305 mm/minuto, según lo establecido por la norma ASTM, designación: D – 143 – 94.

E. Ensayos químicos

Se cuantificaron los porcentajes de los materiales que formaban parte esencial de la madera para determinar el efecto del hongo en las paredes (lignina insoluble en ácido y solubles en NaOH al 1%), dichos ensayos se realizaron en madera sin tratamiento (testigo) y en la biodegradada.

Se extrajo de las cámaras un total de 28 muestras (aproximadamente 50 g) y se molieron en un molino de martillos Nogueira. Los residuos se tamizaron y se recogió la fracción que pasó por el tamiz malla 40; con el aserrín obtenido se realizaron los diferentes ensayos según lo establecido en las normas publicadas por el Laboratorio de Productos Forestales

de la Universidad de Costa Rica (Blanco 1998). Los ensayos se repitieron 2 o 3 veces según el caso, este ensayo se realizó a los 3 y a los 6 meses de exposición de la madera al hongo.

E.1 Análisis Lignina Klason:

Para la realización de este ensayo se usó el ácido sulfúrico al 72%, el cual hidrolizó y solubilizó los carbohidratos en la madera; la lignina insoluble en el ácido se filtró, secó y pesó.

Debido a que algunos de los extractos de la madera (aceites esenciales, resinas, grasas, ceras, taninos, gomas y almidones) permanecen insolubles con la lignina estos se removieron antes del ensayo (extracción con etanol – Benceno).

El análisis químico se realizó según lo establecido en la norma LPF – QM – 04 del Laboratorio de Productos Forestales.

E.2 Análisis de Solubles en NaOH al 1%:

En este ensayo se usó una solución de álcali caliente, que extrajo carbohidratos de bajo peso molecular, los cuales consisten principalmente de hemicelulosa y celulosa degradada en la madera.

El análisis químico se realizó según lo establecido en la norma LPF – QM – 08 del Laboratorio de Productos Forestales.

F. Ensayo anatómico

Este ensayo se realizó para observar el avance del hongo y así evaluar los cambios microestructurales sufridos por la madera durante las diferentes etapas de colonización, a la mitad y al final del experimento (3 y 6 meses, respectivamente).

Para evitar el colapso de las hifas en las muestras inoculadas, éstas se colocaron en fijadores específicos, en Karnovsky, (glutaraldehído 2,5%, paraformaldehído 2,0% y fosfato de sodio 0,1 m pH 7,4 como amortiguador) (Karnovsky 1965). Para las muestras que fueron observadas al microscopio electrónico y en FAA (formaldehído, ácido acético y alcohol etílico) para las muestras que fueron observadas en el microscopio de luz (Carpio 1992).

Las muestras para la preparación de placas fijas fueron lavadas en agua para remover el fijador (las muestras testigo se cortaron directamente, sin fijador). Se obtuvieron cortes histológicos entre 30 μm y 60 μm de grosor mediante un micrótopo de deslizamiento, que se colorearon con safranina al 2% durante 24 horas aproximadamente, luego se deshidrataron en una escala gradual ascendente de alcoholes (50, 60, 70, 80, 90, 100, 100 %) por un período de dos horas como mínimo en cada concentración y luego se sumergieron en xilol durante 24 horas. Las preparaciones fijas se prepararon con un pegamento sintético (Permunt) y se secaron en una plantilla eléctrica (48 horas aprox.), para ser observadas al microscopio (Carpio 1992).

Se realizaron cortes en madera sana (testigo), así como en madera sometida al ataque del hongo. Se hicieron análisis morfométricos de las fibras según la norma LPF-AN-001, del Laboratorio de Productos Forestales de la Universidad de Costa Rica (Carpio 1997).

Las muestras de madera (0,4 cm x 0,4 cm x 0,5 cm.) fijadas para microscopía electrónica se lavaron en un amortiguador de fosfato durante 75 minutos (5 cambios de 15 minutos), luego se colocaron en una solución de tetraóxido de osmio durante 2 horas y se deshidrataron en una escala gradual ascendente de alcoholes (30, 50, 70, 80, 90, 95, 100,

100%) por un período de 15 minutos en cada concentración. Se secaron por sublimación y se cubrieron con oro para su observación al microscopio electrónico de barrido (Karnovsky 1965).

G. Análisis estadístico

Para el análisis de los datos obtenidos en esta investigación se usó el programa estadístico STATISTICA, las graficas de los resultados se realizaron mediante Box & Whisker plot, donde se determinó la media, el error, la desviación y Line Plot.

Las comparaciones entre los tratamientos y la significancia estadística de estos, se realizaron mediante la prueba Post-Hoc Comparisons of Means (comparación de medias), LSD (diferencia mínima significativa), con un nivel alfa de rango crítico de 0.05 y 95% niveles de confianza.

RESULTADOS

I. Ensayo anatómico

I.A. Características generales de la madera de teca (Tectona grandis):

El duramen cambia de verde olivo a pardo dorado con el secado. La albura es amarillenta o blanquecina y difiere marcadamente del duramen. Se presentan anillos porosos y anillos anuales de crecimiento muy evidentes.

El área promedio de albura varió según la edad de los árboles estudiados de 63,56% en los de 6 años a 62,5% para los de 10 años. La textura (número de vasos y de rayos) de la madera fue uniformemente mediana y más o menos aceitosa al tacto (especialmente el duramen). Se detectó una fragancia suave después del secado.

I.B. Descripción:

La madera presenta un parénquima visible a simple vista, el parénquima axial es escaso, del tipo paratraqueal vasicéntrico, con paredes gruesas (Fig. 4), de color mas claro que el resto del tejido.

La porosidad es circular (con vasos ubicados cerca de los anillos de crecimiento) o semicircular (en forma difusa). Se encuentran vasos múltiples (2 – 3) aunque la mayoría son solitarios, de forma ovalada a redonda (menos frecuente) pequeños y su tamaño decrece gradualmente hacia el anillo de crecimiento (Fig. 5); la mayoría están ubicados cerca de los rayos (Fig. 6).

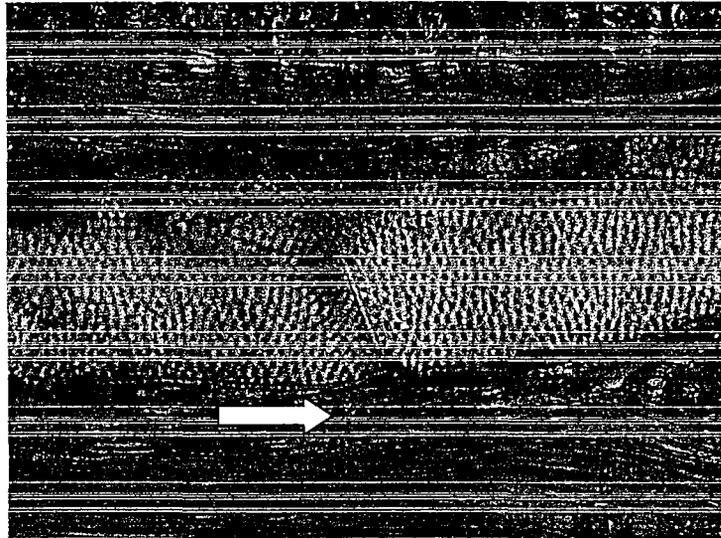


Fig. 4. Corte tangencial de madera de teca (20 X). La flecha señala el parénquima paratraqueal vasicéntrico.

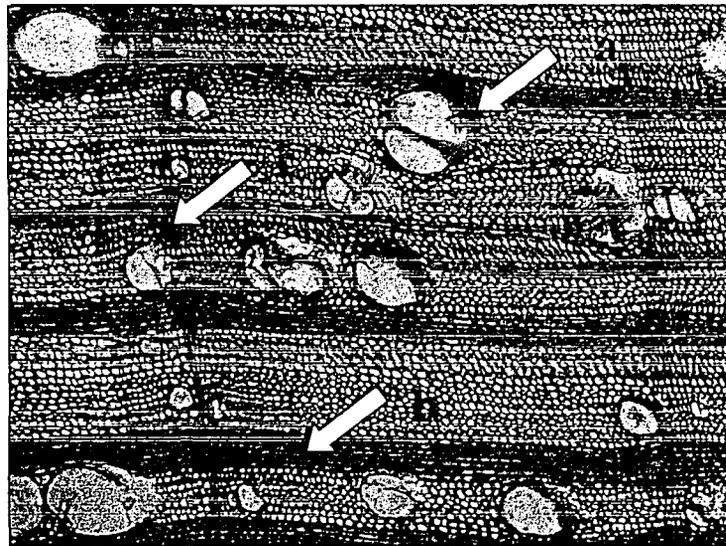


Fig. 5. Corte transversal (4 X) de madera de teca, (a) vasos múltiples, (b) rayo, (c) anillos de crecimiento.

Los elementos de los vasos se conectan mediante placas perforadas simples, las cuales son ligeramente inclinadas (Figs. 7 y 8)

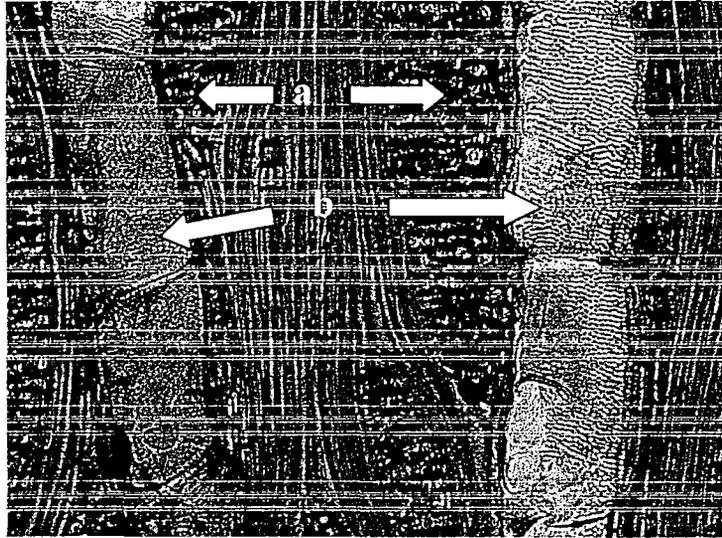


Fig. 6. Corte tangencial de madera de teca (20X), nótese la ubicación de los elementos de los vasos, (a) rayo, (b) elemento del vaso.

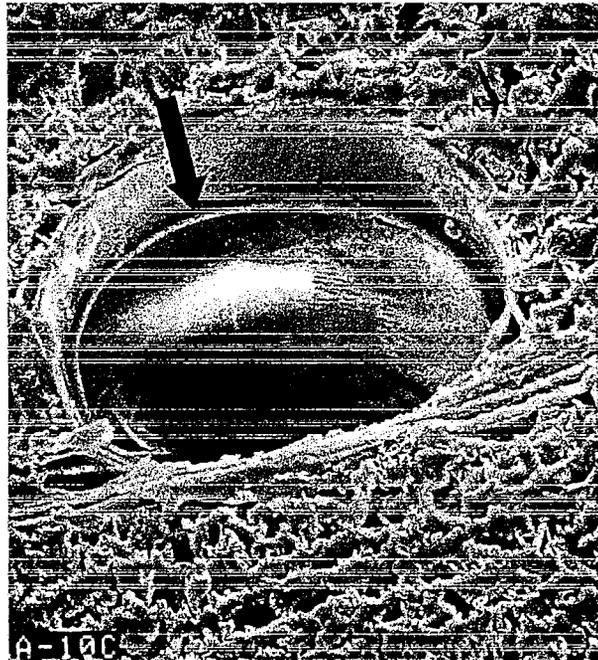


Fig. 7. Corte transversal de madera de teca. Nótese los miembros de los vasos con placas perforadas simples.

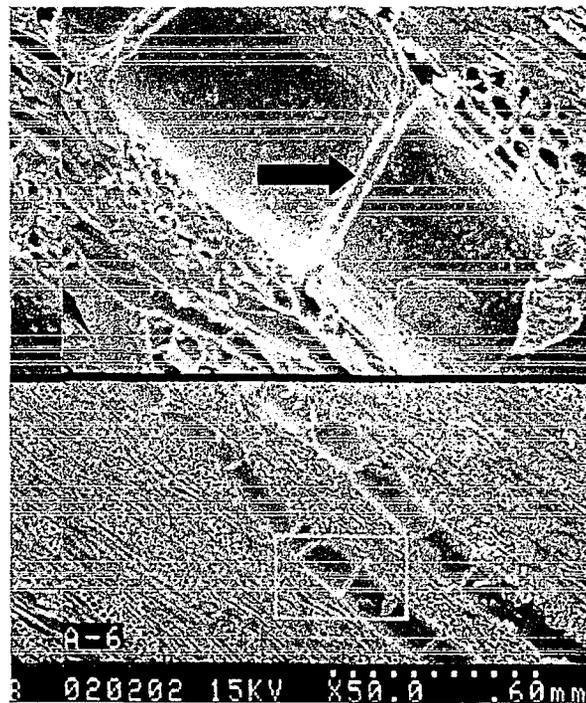


Fig. 8. Corte longitudinal de madera de teca, con placas perforadas ligeramente inclinadas.

Algunos de los vasos muestran tílides (depósitos parenquimatosos en los lúmenes de los vasos). El punteado vascular es opuesto y alterno, de forma ovalada a redonda, algunas punteaduras con aperturas rebordeadas (Figs 9 – 11).

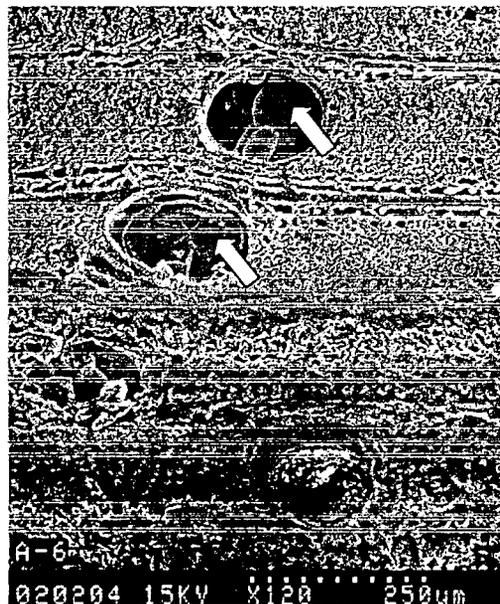


Fig. 9. Corte transversal de madera de teca, las flechas

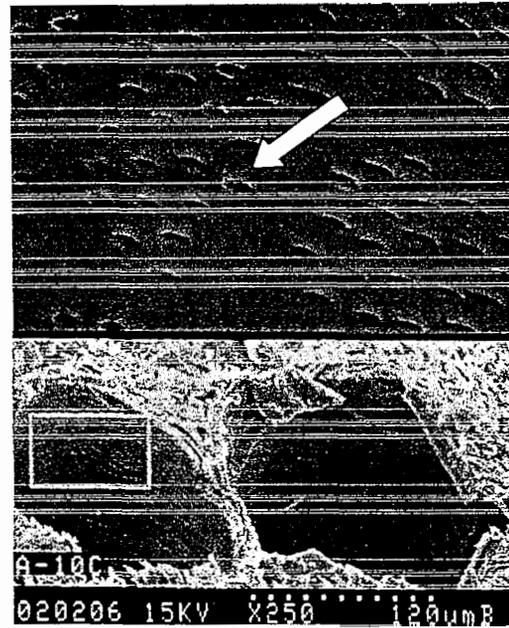


Fig. 10. Corte transversal de elemento de los vasos con puntuaciones simples y opuestas.

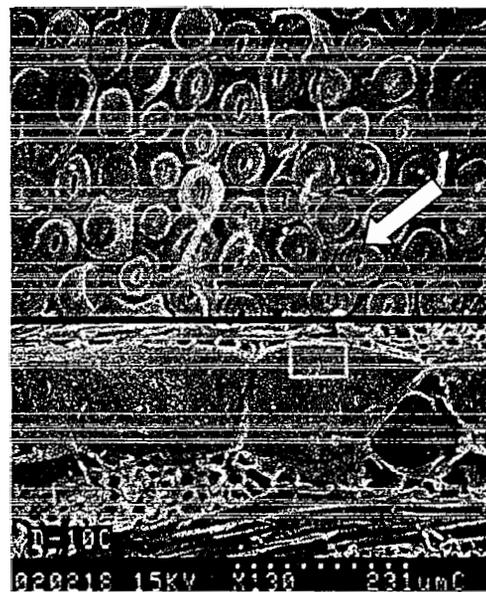


Fig. 11. Corte longitudinal de elemento de los vasos, la flecha señala una punteadura rebordeada.

Los rayos son muy abundantes, medianos y observables a simple vista, son homogéneos multiseriados de mas o menos 30 células de largo y de 2 a 6 células de ancho (Figs. 12, 13).

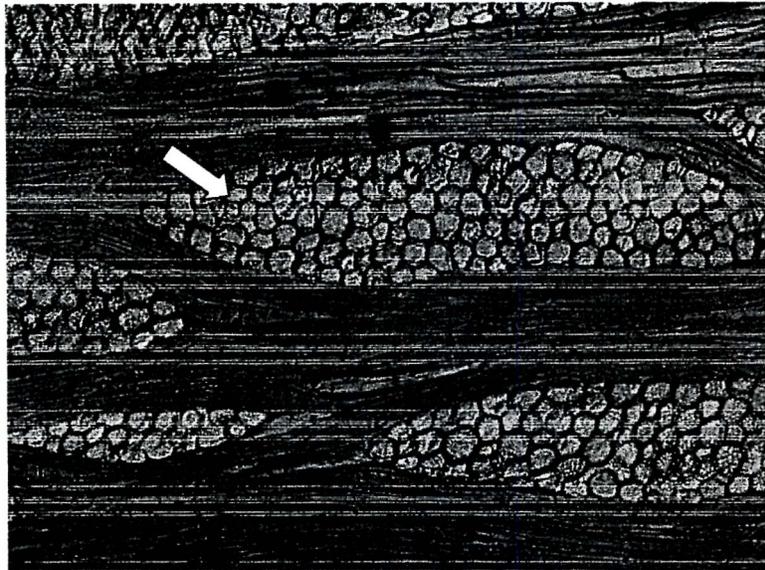


Fig. 12. Corte tangencial (20 X) de madera de teca, la flecha señala células del parénquima radial.

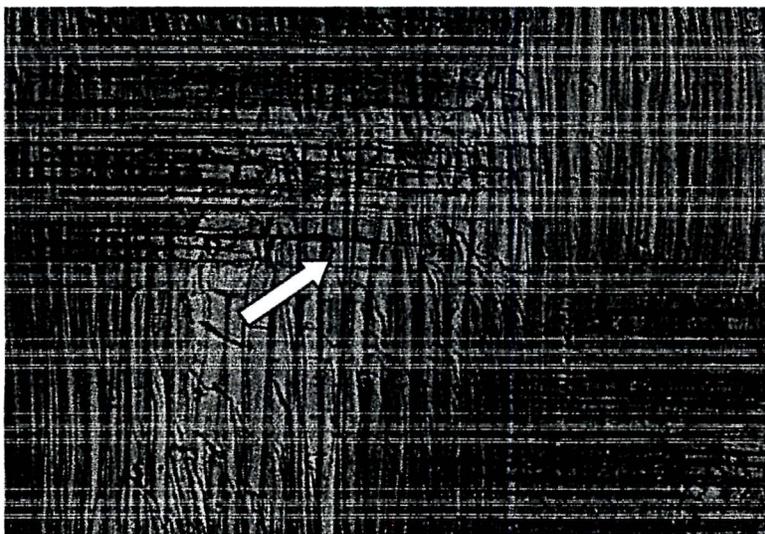


Fig. 13. Corte radial (10 X) de madera de teca, nótese la forma, tamaño y disposición de las células radiales.

Las fibras de teca son libriformes, septadas con punteduras simples y escasas (Figs. 14, 15). Se clasifican según su longitud como medianas (más del 70%) y cortas. Se caracterizan por poseer un diámetro mediano y pared delgada (Cuadro 1)

Cuadro 1. Caracterización morfométrica de las fibras de teca para madera de 6 y 10 años de edad.

Edad (años)	Longitud de la fibra (μm)	Diámetro tangencial (μm)	Lumen (μm)	Grosor de la pared (μm)
6	998.92	24.21	15.77	4.22
10	1122.02	23.29	13	5.1

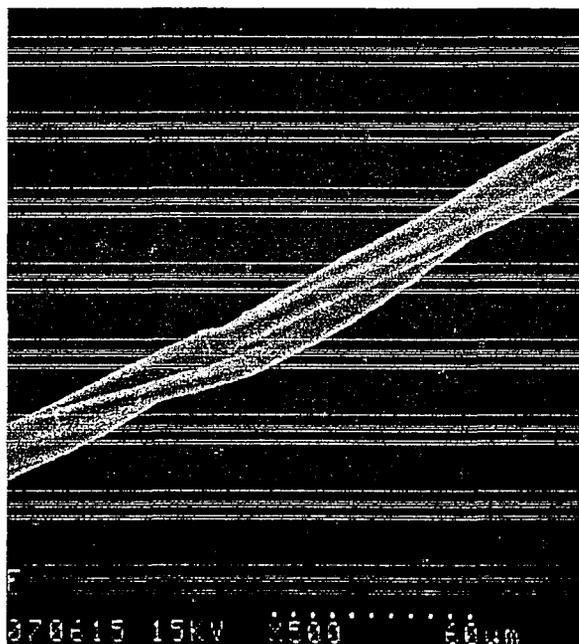


Fig. 14. Fibra libriforme.

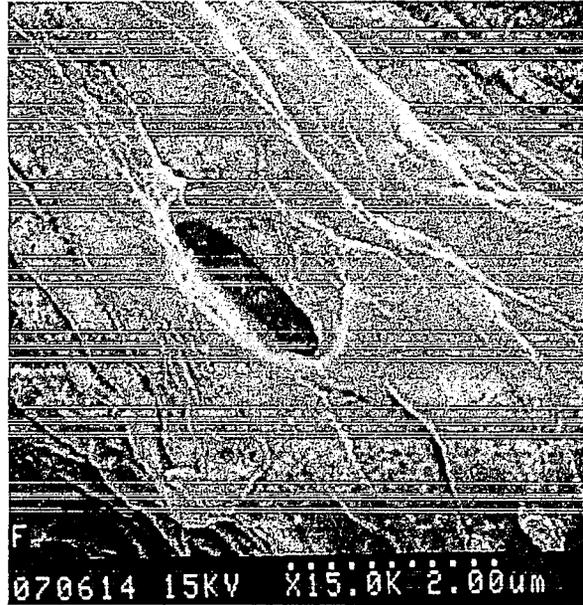


Fig. 15. Punteadura simple en fibra libriforme.

D. Proceso de infección.

El hongo *Rigidoporus* sp. es un Basidiomicete que pertenece al orden Poriales, se caracteriza por presentar en cultivo hifas fibuladas (conexiones en grapa o gancho a manera de puente) características del micelio secundario, (Fig. 16). En la naturaleza presenta un sistema hifal monomítico; aparentemente produce podredumbre blanca simultánea.



Fig.16. Hifa del hongo *Rigidoporus* sp. Las flechas muestran las fibulas.

El hongo cubrió de micelio las muestras de madera de albura de 6 y 10 años y duramen de 6 años en aproximadamente 21 días, y el duramen de 10 años en aproximadamente 35 días. La mayoría de las muestras fueron cubiertas por micelio (Figs. 17 y 18); sin embargo, en todos los tratamientos hubo muestras donde las hifas del hongo crecieron escasamente y no llegaron a cubrir completamente la muestra.

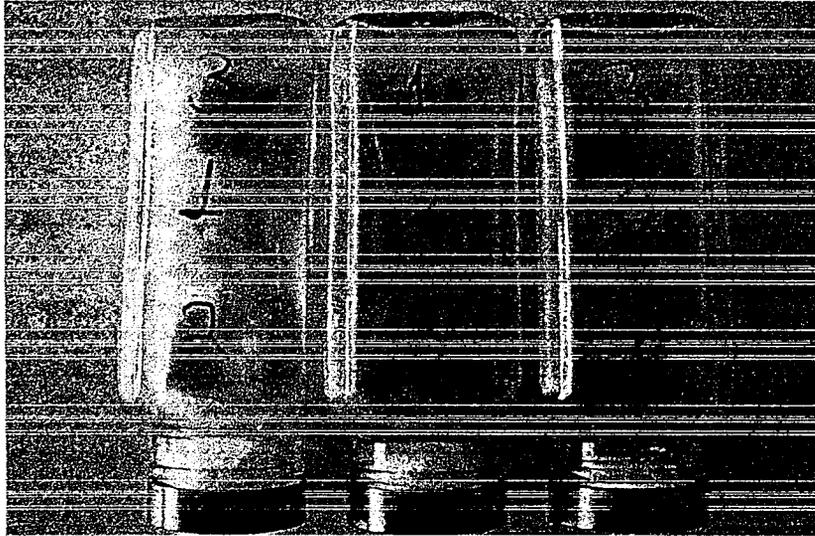


Fig. 17. Muestras de madera cubiertas de micelio.

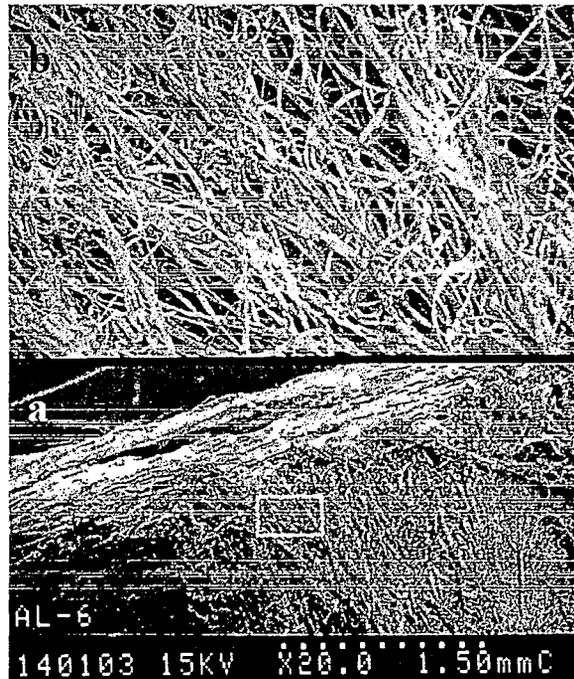


Fig. 18. Muestra de madera cubierta de micelio
(a), (b) acercamiento de masa micelial.

Se observó una preferencia por parte del hongo por invadir el parénquima radial durante los primeros 3 meses de exposición de la madera al hongo (Figs. 19 y 20). Esto provocó un desprendimiento y desacomodo de las fibras adyacentes, daño que fue en aumento con el tiempo de exposición (Figs. 21 y 22). Una vez invadido y degradado el parénquima radial, al parecer el hongo pasó a degradar los elementos de los vasos, ya que se observó hifas que invadían y degradaban estas estructuras (Fig. 23). Al final de los 6 meses de exposición, fue posible observar algunas áreas (incluidas las fibras) con daños severos (Fig. 24).

Las hifas penetraron por punteaduras de los vasos y de las fibras (Fig. 25).

La degradación de las estructuras internas del tejido no se relacionó en todos los casos con el cubrimiento de las muestras por el micelio (Fig. 26).

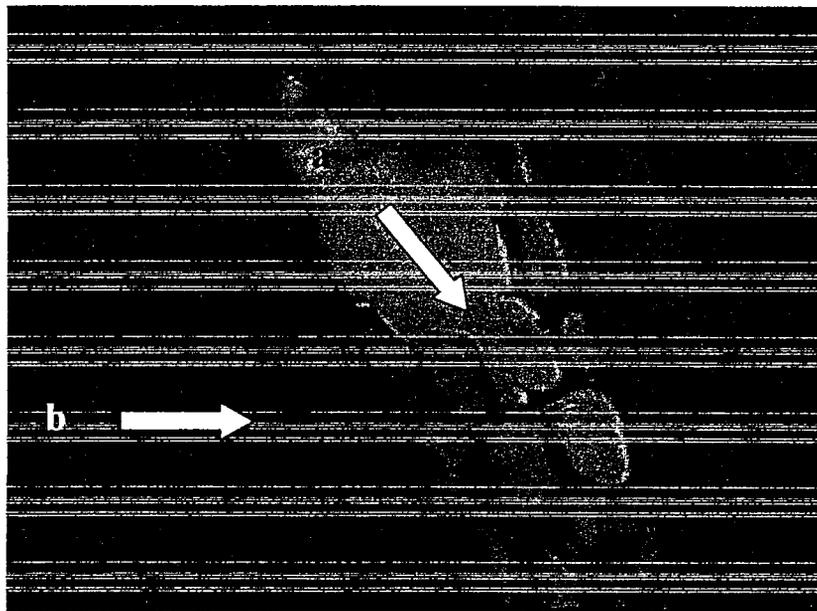


Fig. 19. Corte tangencial (20 X) de madera de teca después de 3 meses de exposición, nótese el parénquima radial degradado y los tejidos adyacentes sin daño aparente, (a) parénquima radial, (b) fibras.

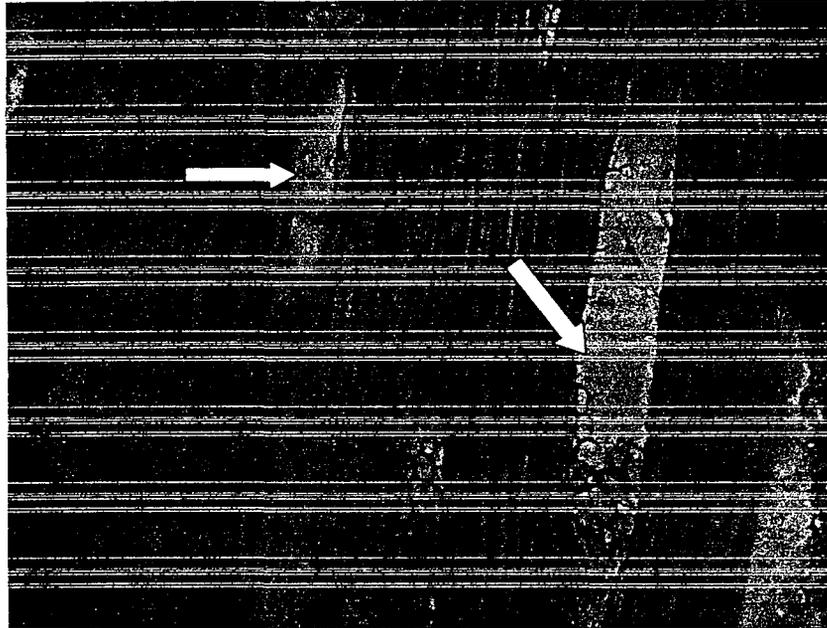


Fig. 20. Corte tangencial (10 X) de madera de teca después de 6 meses de exposición. Nótese el parénquima radial degradado.

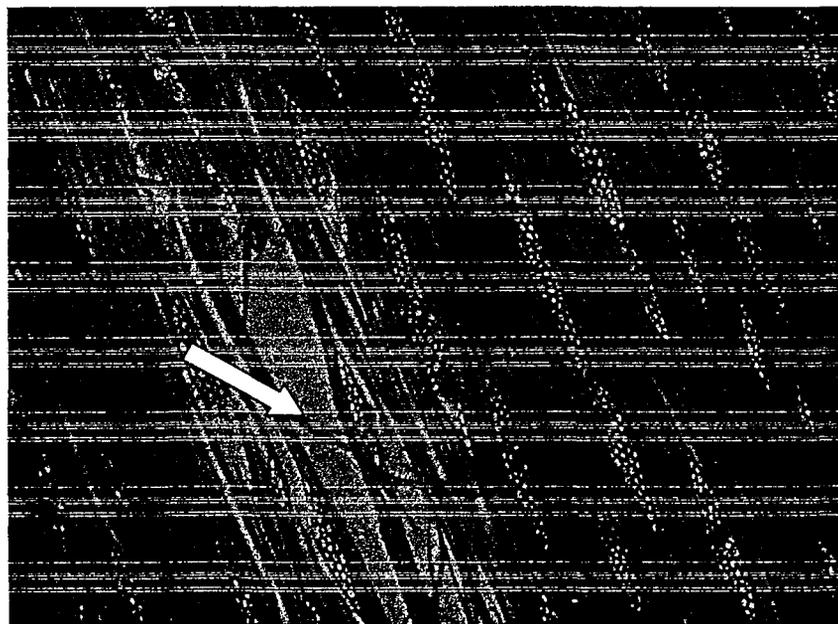


Fig. 21. Corte tangencial de madera de teca (4X) después de 3 meses de exposición al hongo, la flecha señala el desprendimiento de las fibras en el área atacada.

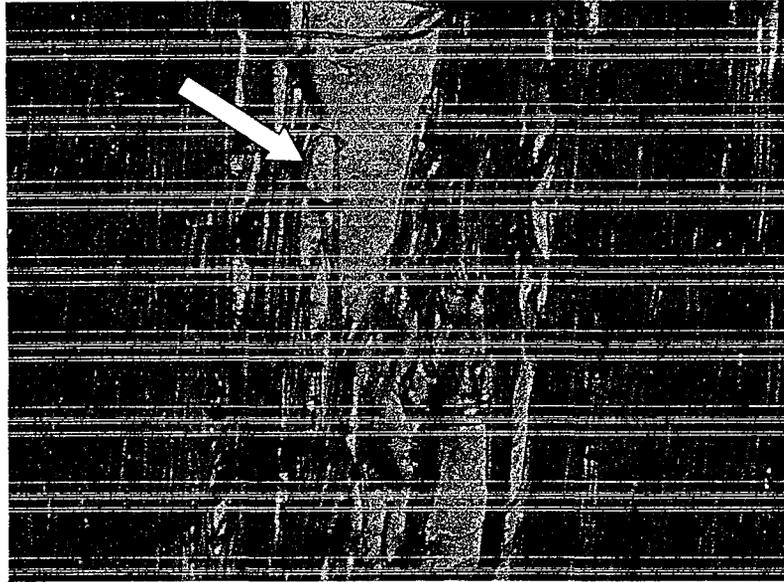


Fig. 22. Corte tangencial (4 X) de madera de teca después de 6 meses de exposición, nótese el mayor desprendimiento de las fibras en el área dañada.

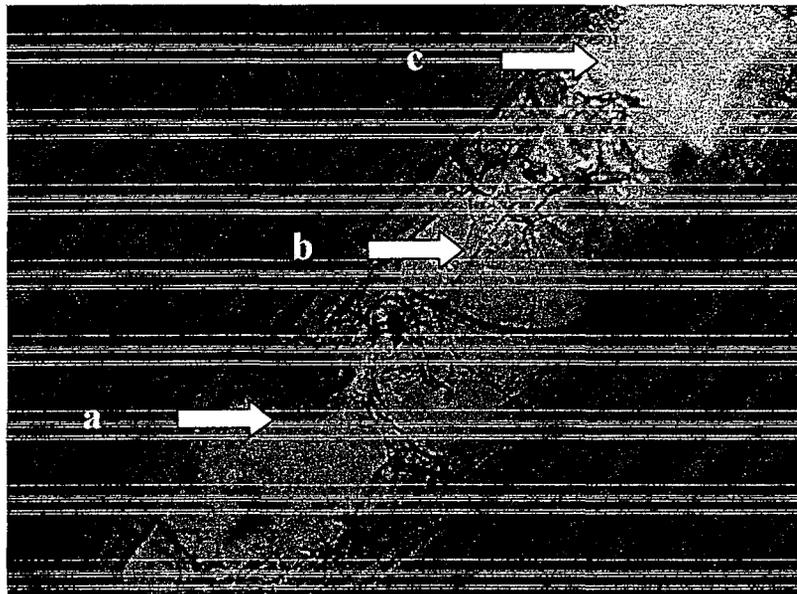


Fig. 23. Corte radial de madera de teca (20X), (a) elemento de los vasos, (b) hifas, (c) pared degradada.

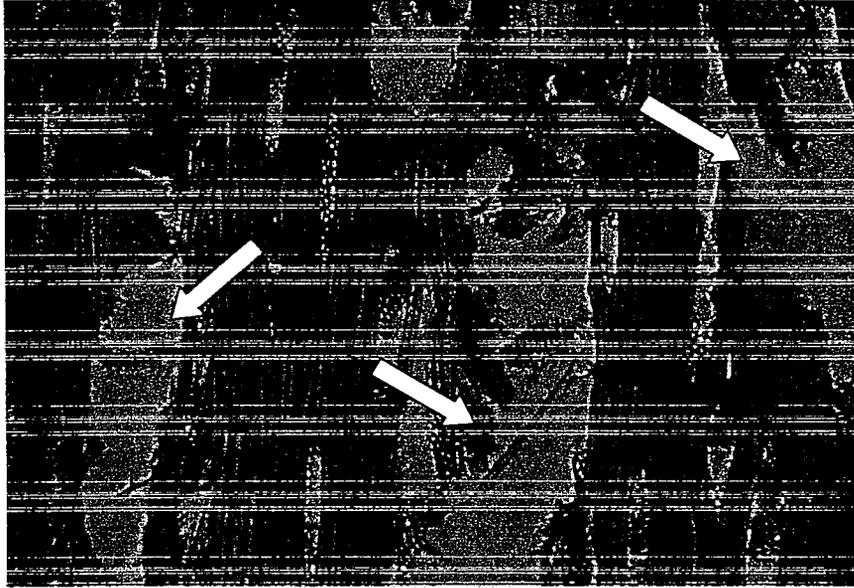


Fig. 24. Corte tangencial de madera de albura de teca (4X) después de 6 meses de exposición al hongo, las flechas señalan áreas totalmente dañadas.



Fig. 25. Penetración de hifa por punteadura de elemento de los vasos.

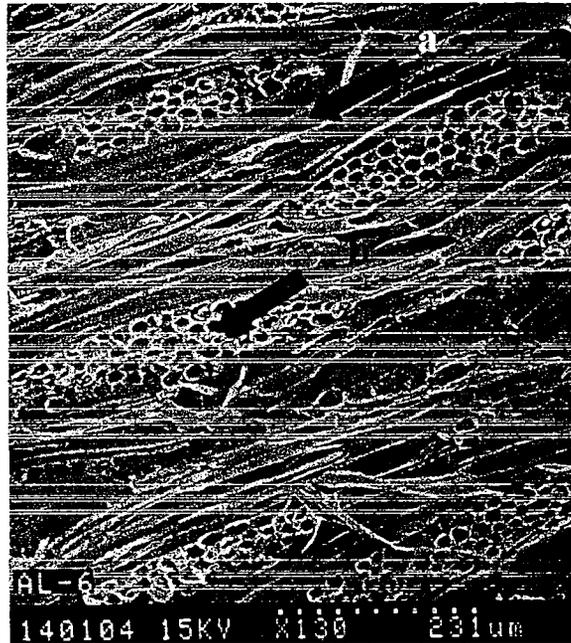


Fig. 26. Corte tangencial de madera de teca después de 3 meses de exposición. Nótese las estructuras inalteradas, (a) fibras, (b) parénquima radial.

Las hifas del hongo penetraron los elementos de los vasos y los degradaron, el daño fue mayor en la albura de 6 años, muchos tejidos, principalmente del duramen de 10 años, permanecieron inalterados (Figs. 27 – 30).

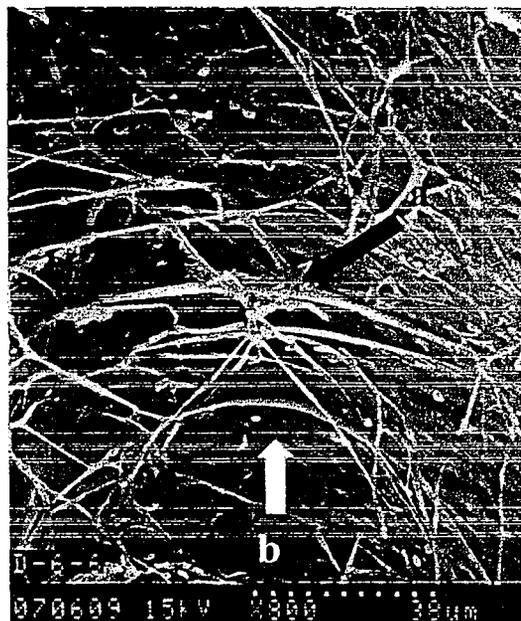


Fig. 27. Corte longitudinal de vaso, (a) hifas, (b) pared de vaso.



Fig. 28. Corte tangencial de elemento de los vasos en madera de albura de 6 años, degradada por el hongo después de 6 meses de exposición.



Fig. 29. Borde de elemento de vaso en madera de teca de 6 años, después de 6 meses de exposición, nótese la ruptura de la pared.

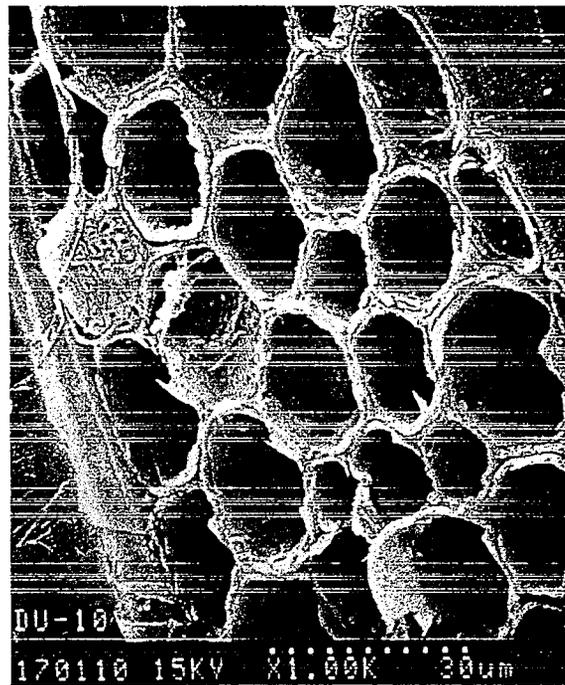


Fig. 30. Corte tangencial de duramen de 10 años, después de 6 meses de exposición, nótese las células parenquimatosas inalteradas.

Durante el proceso de infección pudo observarse un aparente hundimiento de las hifas en la pared del elemento de los vasos, esto dejó una especie de surcos o erosiones en la misma. Este tipo de hundimiento de la hifa se observó en todas las muestras de madera expuestas al tratamiento biológico (Fig. 31).

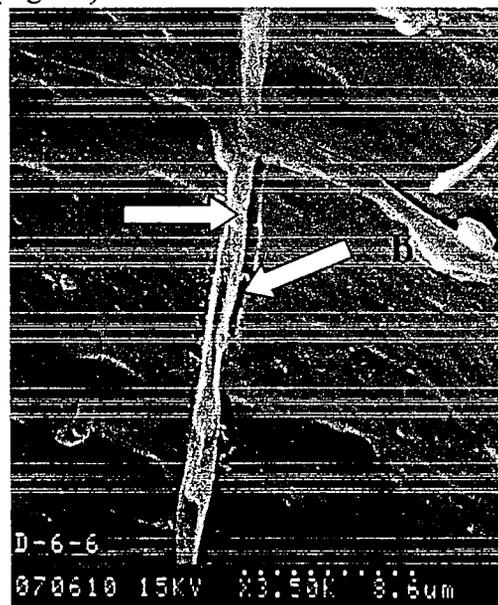


Fig. 31. Pared de vaso de teca. (a) hifa. (b) surco.

Se observó, además del hundimiento, paredes con grietas. (Figs. 32)



Fig. 32. Pared de los elementos de los vasos agrietadas (a), (b) hifa.

El número y tamaño de las grietas en las paredes de los elementos de los vasos, especialmente en la madera de albura de 6 y 10 años, aumentó a los 6 meses de exposición (Fig. 33).

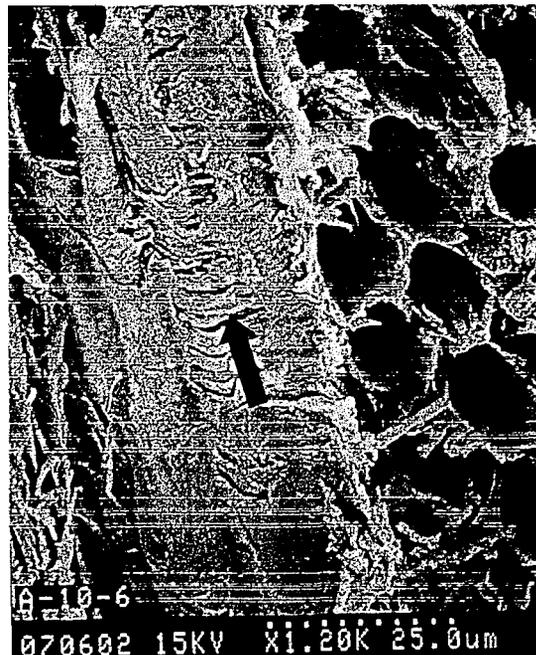


Fig. 33. Pared de vaso con grietas.

II. Ensayo físico

II.A Características de la madera

Las muestras de madera de duramen y albura de 6 y de 10 años, se caracterizaron por poseer un contenido de humedad aproximado de 9,96 %, con diferencias mínimas entre los diferentes tipos de madera (duramen, albura) y edades (6 y 10 años).

Las muestras de madera de duramen y albura de 6 y de 10 años, se caracterizaron por poseer una densidad en promedio de 0,54 g/cm³.

La madera de albura de 6 años mostró una densidad de 0,51 g/cm³, la albura de 10 años 0,53 g/cm³, el duramen de 6 años 0,49 g/cm³ y el duramen de 10 años 0,61 g/cm³, Fig. 34

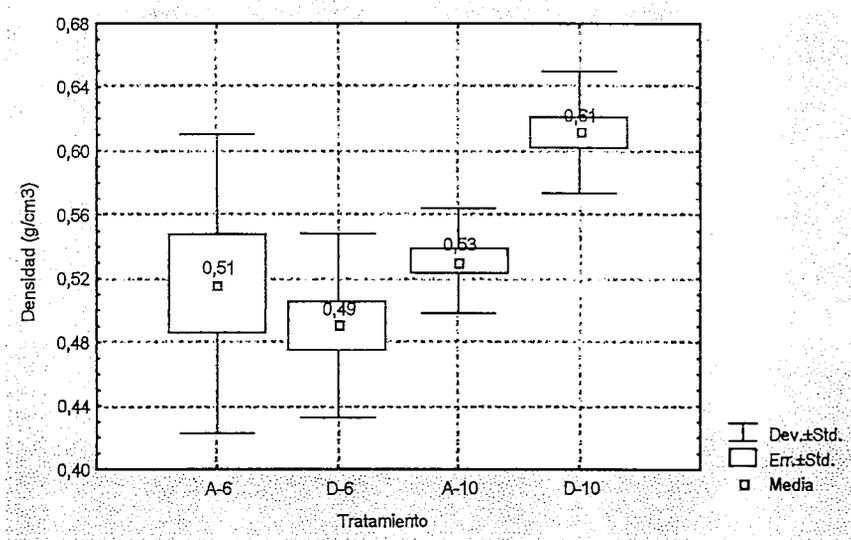


Fig. 34. Densidad de la madera de teca proveniente de las plantaciones de Flor y Fauna , albura de 6 años (A-6), duramen de 6 años (D-6), albura de 10 años (A-10), duramen de 10 años (D-10).

II.B. Pérdida de masa (base seca):

El tratamiento en autoclave de las muestras de madera después de la saturación al vacío causó una pérdida de 1,66% a 0,62% en base seca de su masa inicial (esta pérdida se representa con una flecha en cada gráfica), con un coeficiente de variación de 31,55% a 56,67%.

Las pérdidas de masa (base seca) de la madera de albura de 6 años oscilaron de 1,29 a 7,96 %, lo que representó las mayores pérdidas de masa obtenidas en este estudio Fig. 35

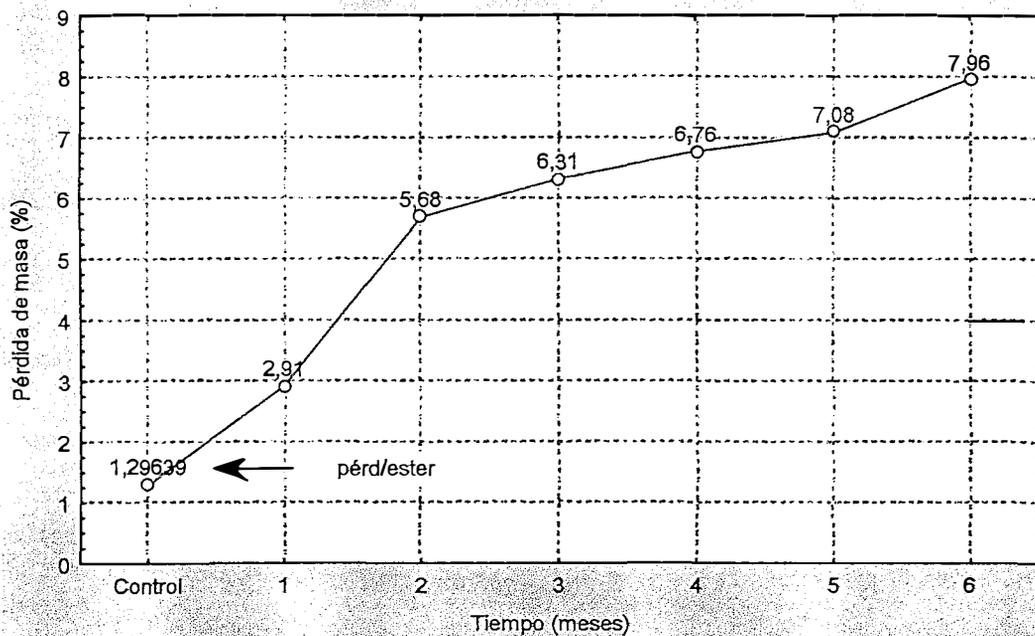


Fig. 35. Pérdida de masa (base seca) en la madera de albura de teca de 6 años, sometida al ataque del hongo *Rigidoporus* sp. durante 6 meses

La pérdida de masa de la albura de 10 años y el duramen de 6 años fue similar y alcanzó al final de los 6 meses un 5,76% y 5,99%, respectivamente (Figs. 36 y 37)

La tendencia en todos los casos fue de aumentar a través del tiempo.

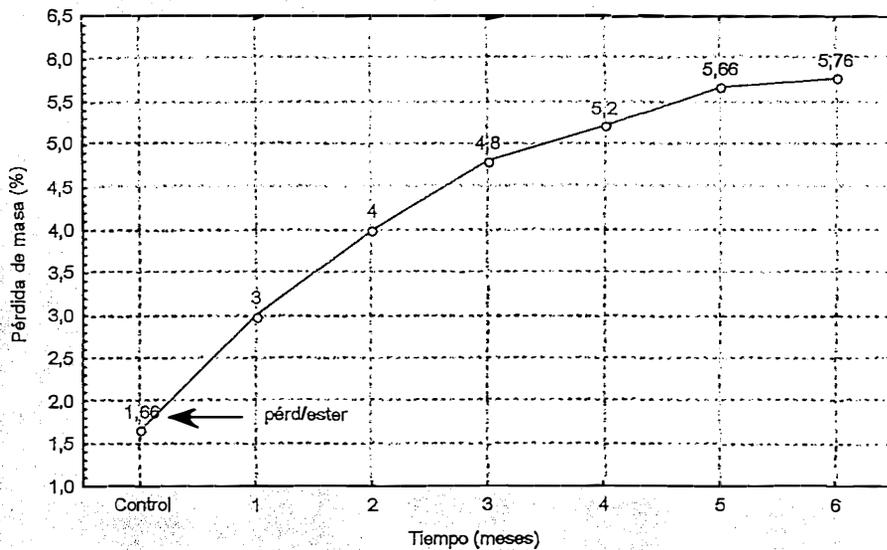


Fig. 36. Pérdida de masa (base seca) en la madera de albura de teca) de 10 años, sometida al ataque del hongo *Rigidoporus* sp. durante 6 meses

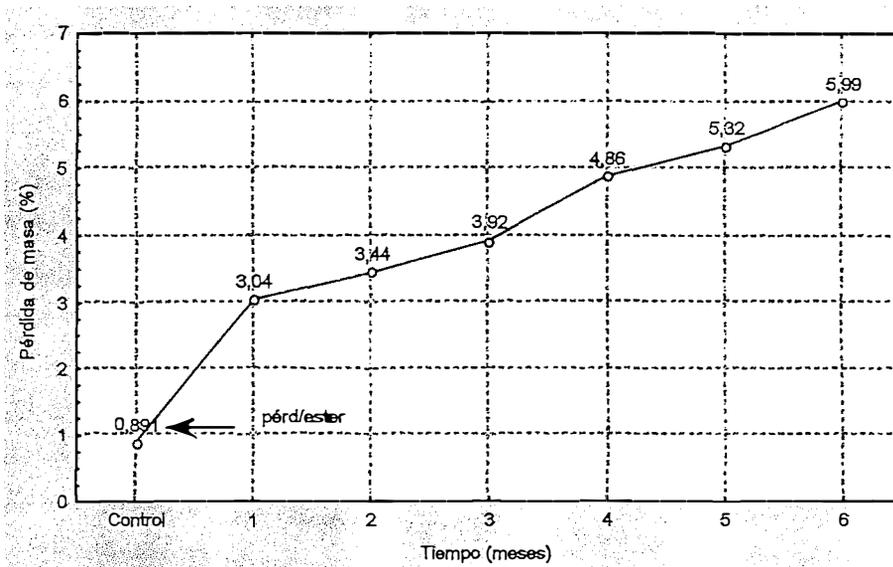


Fig. 37. Pérdida de masa (base seca) en la madera de duramen de teca de 6 años, sometida al ataque del hongo *Rigidoporus* sp. durante 6 meses

Las menores pérdidas de masa correspondieron a la madera de duramen de 10 años, con solamente un 1,62% después de 6 meses de exposición al hongo (Fig. 38).

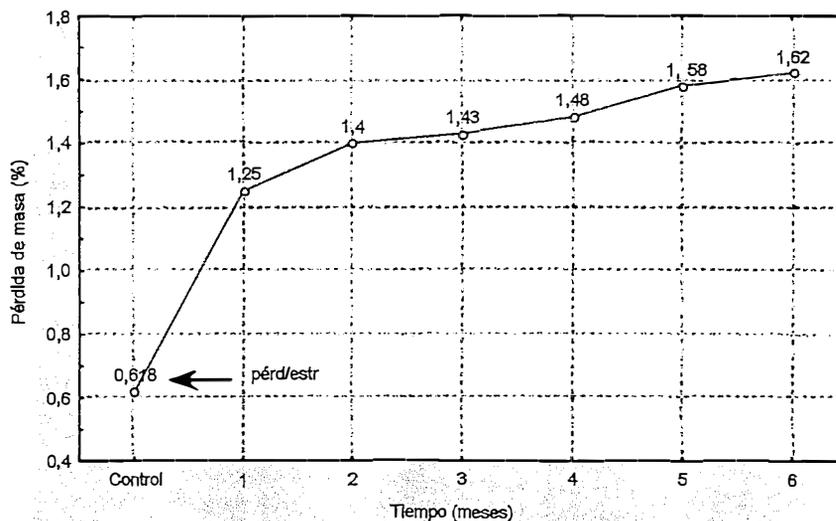


Fig. 38. Pérdida de masa (base seca) en la madera de duramen de teca de 10 años, sometida al ataque del hongo *Rigidoporus* sp. durante 6 meses.

En la Fig. 39 se comparan las pérdidas de masa en los diferentes tratamientos. Obsérvese la tendencia casi horizontal del duramen de 10 años y las mayores pérdidas en la albura de 6 años.

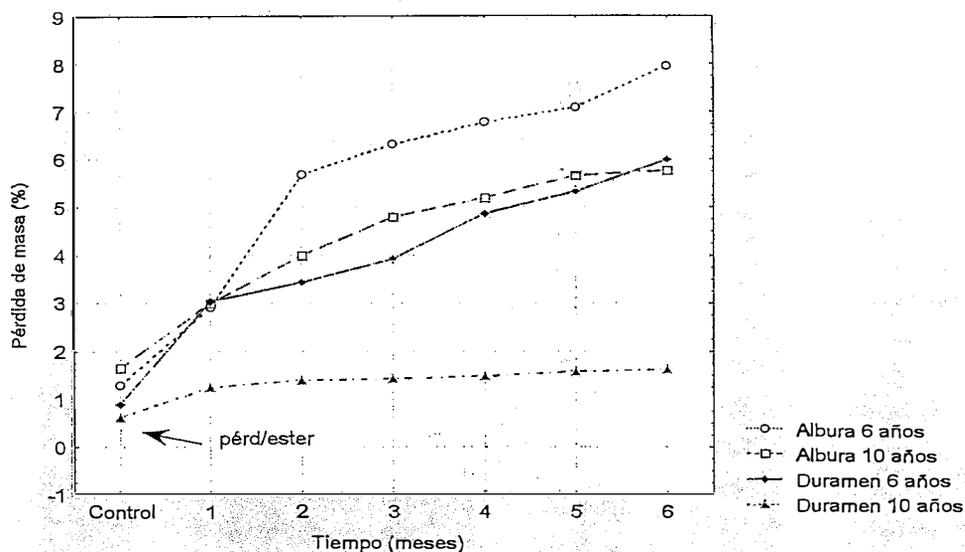


Fig. 39. Comparación entre las pérdidas de masa (base seca) de la madera de teca de albura y duramen de 6 y 10 años, sometidas al ataque del hongo *Rigidoporus* sp. durante 6 meses.

Se comparó las pérdidas de masa (medias) en los diferentes tratamientos al tercer mes de exposición al agente biológico. El Cuadro 2 muestra que no hubo diferencias estadísticamente significativas entre la madera de albura de 10 años y madera de duramen de 6 años, aunque al principio (2,3 mes) la albura de 10 años mostró una pérdida mayor, al final de este período de tiempo (3 meses) las pérdidas fueron similares.

Cuadro 2. Comparación de medias (DMS) de las pérdidas de masa, de los diferentes tratamientos a los tres meses de infección. Albura de 6 años (A-6), duramen de 6 años (D-6), albura de 10 años (A-10), duramen de 10 años (D-10).

Tratamiento	A-6	D-6	A-10	D-10
	6,314265	3,918223	4,798944	1,434562
A-6		0,000879 *	0,030184 *	0 *
D-6	0,000879 *		0,193554	0,000482 *
A-10	0,030184 *	0,193554		0,000006 *
D-10	0 *	0,000482 *	0,000006 *	

Se aplicó la misma prueba estadística a los 6 meses de exposición (Cuadro 3) y la tendencia se mantuvo igual entre albura de 10 años y duramen de 6 años (sin diferencias estadísticamente significativas en cuanto pérdidas de masa)

Cuadro 3. Comparación de medias (DMS) de las pérdidas de masa, de los diferentes tratamientos a los 6 meses de infección. Albura de 6 años (A-6), duramen de 6 años (D-6), albura de 10 años (A-10), duramen de 10 años (D-10).

Tratamiento	A-6	D-6	A-10	D-10
	7,961601	5,991926	5,767899	1,620947
A-6		<i>0,000078 *</i>	<i>0,000006 *</i>	0 *
D-6	<i>0,000078 *</i>		0,630952	0 *
A-10	<i>0,000006 *</i>	0,630952		0 *
D-10	0 *	0 *	0 *	

* Los números con asterisco en itálica representan diferencia significativa entre los tratamientos.

III. Ensayo mecánico:

Compresión paralela al grano:

La resistencia máxima a la compresión que presentaron los diferentes tratamientos (albura y duramen de 6 y 10 años) sin ser expuestos a la acción del hongo (testigos) se encuentra en un ámbito promedio de 600 a 814 kg/cm² (Fig. 40)

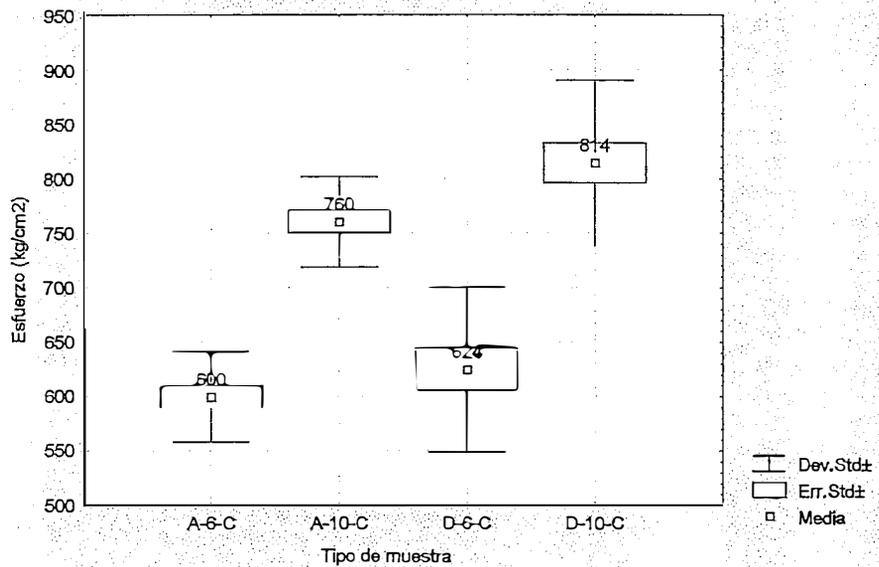


Fig. 40. Compresión paralela al grano de la madera de albura y duramen de teca de 6 y 10 años sin tratamiento biológico. Albura de 6 años (A-6-C), albura de 10 años (A-10-C), duramen de 6 años (D-6-C), duramen de 10 años (D-10-C).

Se realizó la prueba de compresión paralela al grano a los tres y a los seis meses de exposición al hongo y en todos los tratamientos se observó pérdida de resistencia en la madera a través del tiempo.

Esta pérdida de resistencia se acentuó más en la madera de albura de 6 años, en este caso, los valores variaron desde 600 kg/cm² (en la madera sin tratamiento biológico) a 544 kg/cm² y 486 kg/cm² a los 3 y a los 6 meses de exposición, respectivamente. (Fig. 41).

Cuadro 4. Comparación de medias (DMS) de la compresión paralela al grano de la madera de albura de teca de 6 años sometida al ataque de *Rigidoporus* sp. Testigo (A-6-0), tres meses de exposición (A-6-3), seis meses de exposición (A-6-6)

Tratamiento	A-6-0	A-6-3	A-6-6
	599,6907	543,6110	486,5287
A-6-0		0,03006008 *	2,2122E-05 *
A-6-3	0,03006008 *		0,0493742 *
A-6-6	2,2122E-05 *	0,0493742 *	

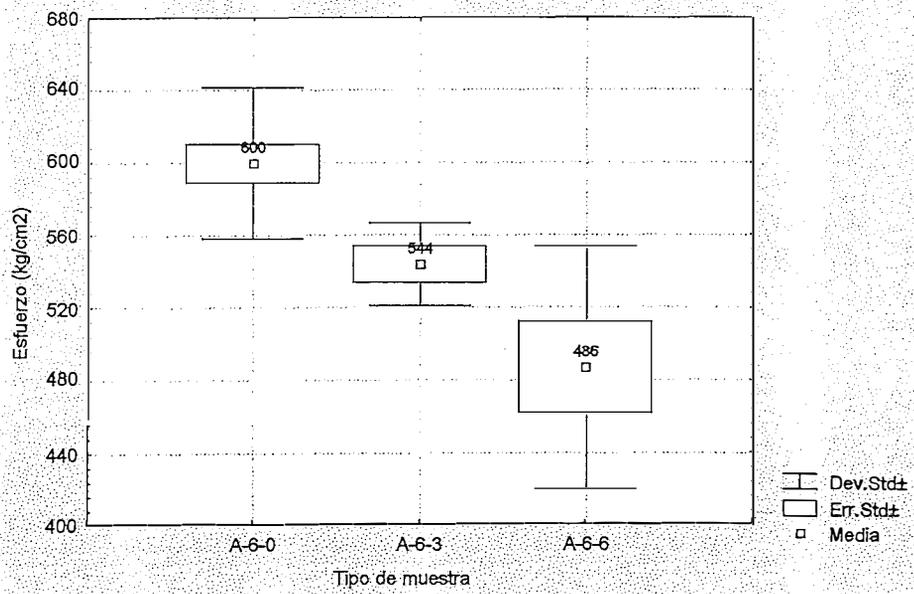


Fig. 41 Compresión paralela al grano de la madera de albura de teca de 6 años sometida al ataque de *Rigidoporus* sp. Albura de 6 años testigo (A-6-0), albura de 6 años después de 3 meses de exposición (A-6-3), albura de 6 años después 6 meses (A-6-6) de exposición

En esta madera, la pérdida de resistencia fue estadísticamente significativa con respecto a las muestras testigo a los 3 y a los 6 meses de exposición (Cuadro 4).

En el caso de la madera de albura de 10 años los esfuerzos variaron desde, 760 kg/cm² en las muestras testigo hasta 752 kg/cm² a los tres meses y 692 kg/cm² a los seis meses de exposición al hongo, aunque a diferencia con la madera de albura de 6 meses, la pérdida de resistencia, con respecto a las muestras testigo, fue estadísticamente significativa hasta el sexto mes de exposición (Cuadro 5, Fig. 42).

Cuadro 5. Comparación de medias (DMS) de la compresión paralela al grano de la madera de albura de teca de 10 años sometida al ataque de *Rigidoporus* sp. Testigo (A-10-0), tres meses de exposición (A-10-3), seis meses de exposición (A-10-6)

Tratamiento	A-10-0	A-10-3	A-10-6
	760,5275	751,6086	692,104
A-10-0		0,760787	0,011145 *
A-10-3	0,760787		0,088274
A-10-6	0,011145 *	0,088274	

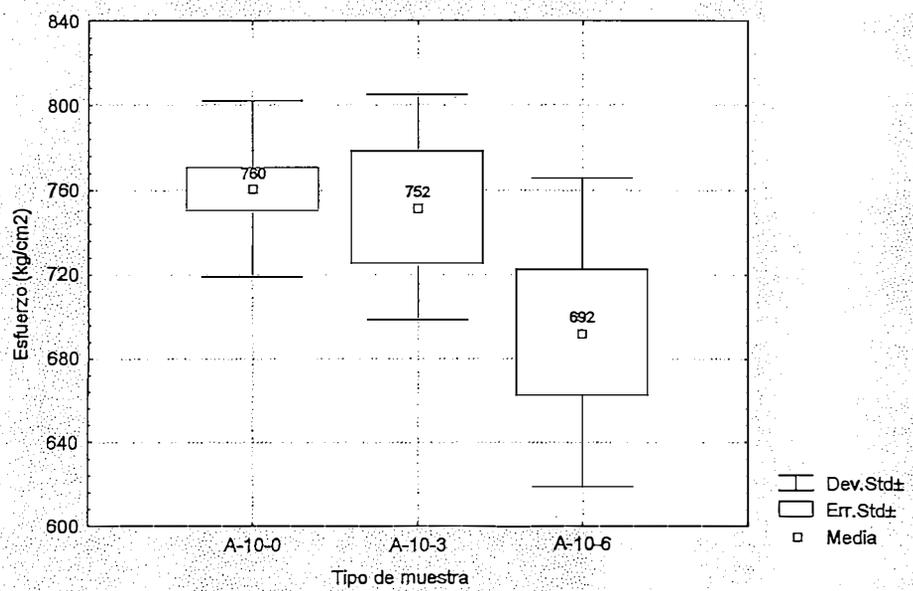


Fig. 42. Compresión paralela al grano de la madera de albura de teca de 10 años sometida al ataque de *Rigidoporus* sp. Albura de 10 años testigo (A-10-0), albura de 10 años después de 3 meses de exposición (A-10-3), albura de 10 años después 6

El duramen de 6 años, experimentó cambios en el esfuerzo aplicado que fueron desde 624 kg/cm², en las muestras testigo a 553 kg/cm² y 557 kg/cm² a los 3 y 6 meses de exposición. Al igual que en la albura de 10 años, la pérdida de esfuerzo fue estadísticamente significativa hasta el sexto mes (Cuadro 6, Fig. 43)

Cuadro 6. Comparación de medias (DMS) de la compresión paralela al grano de la madera de duramen de teca de 6 años sometida al ataque de *Rigidoporus* sp. Testigo (D-6-0), tres meses de exposición (D-6-3), seis meses de exposición (D-6-6)

Tratamiento	D-6-0	D-6-3	D-6-6
	624,3329	553,3042	557,4619
D-6-0		0,0837719	0,04766247 *
D-6-3	0,0837719		0,92514277
D-6-6	0,04766247 *	0,92514277	

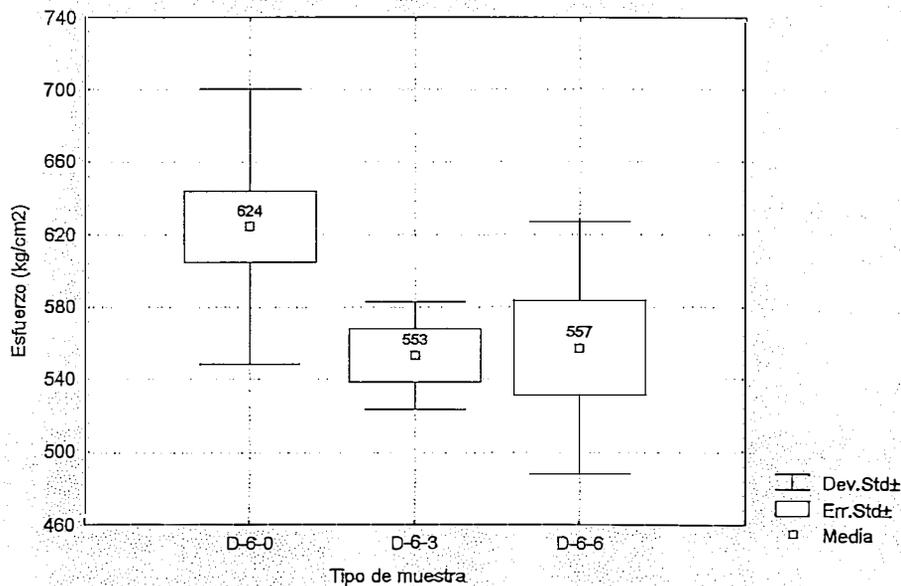


Fig. 43. Compresión paralela al grano de la madera de duramen de teca de 6 años, sometida al ataque de *Rigidoporus* sp. Duramen de 6 años testigo (D-6-0), duramen de 6 años después de 3 meses de exposición (D-6-3) y duramen de 6 años después de 6 meses (D-6-6) de exposición.

La variación de esfuerzo aplicado en la madera de duramen de 10 años, fue desde 814 kg/cm² para la madera testigo a 749 kg/cm² a los tres meses y a 750 kg/cm² a los seis meses de exposición.

Las variaciones obtenidas en este tipo de madera no fueron significativas, con respecto a las muestras testigo, ni a los 3 o 6 meses de exposición (Cuadro 7, Fig. 44).

Cuadro 7. Comparación de medias (DMS) de la compresión paralela al grano de la madera de duramen de teca de 10 años sometida al ataque de *Rigidoporus* sp. Testigo (D-10-0), tres meses de exposición (D-10-3), seis meses de exposición (D-10-6)

Tratamiento	D-10-0	D-10-3	D-10-6
	814,3112	748,7543	750,4167
D-10-0		0,094285	0,058439
D-10-3	0,094285		0,969977
D-10-6	0,058439	0,969977	

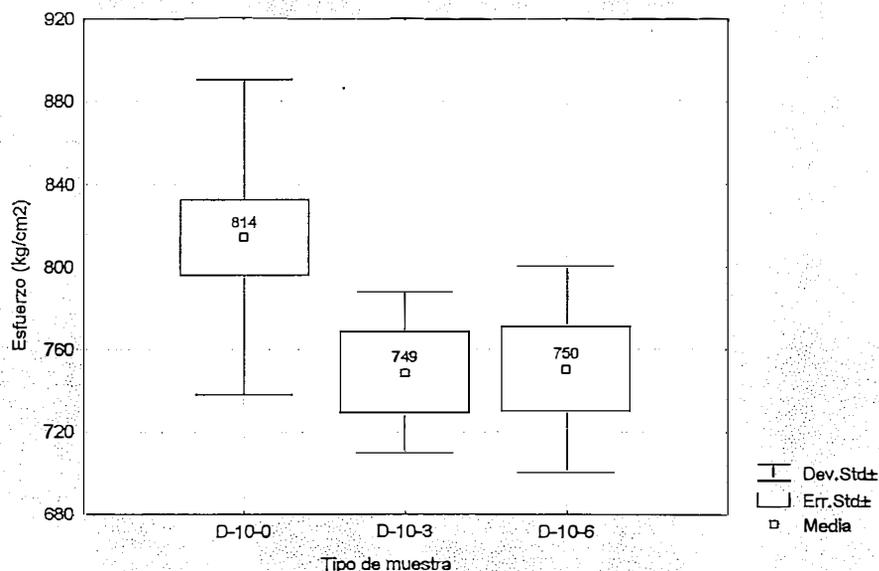


Fig. 44 Compresión paralela al grano de la madera de duramen de teca de 10 años, sometida al ataque de *Rigidoporus* sp. Duramen de 10 años, testigo (D-10-0), duramen de 10 años después de 3 meses de exposición (D-10-3) y duramen de 10 años después de 6 meses (D-10-6) de exposición.

* Los números con asterisco en itálica representan diferencia significativa entre los tratamientos (StatSoft, Inc 1995).

IV. Ensayos químicos

La variación de los solubles en NaOH al 1% (carbohidratos de bajo peso molecular, los cuales consisten principalmente de hemicelulosa y celulosa degradada en la madera.) y lignina Klason durante el período de prueba, para los diferentes tratamientos, se presenta en los Cuadros 8 y 9 y en la Fig. 45, los datos presentados no incluyen el contenido químico de la madera sin tratamiento biológico, ya que debido a la manera de obtención de la muestra (muestra enviada directamente de la empresa Flora y Fauna) no fue posible hacer comparaciones con los datos obtenidos posteriormente.

La cantidad de material soluble en NaOH al 1% (valores relativos) obtenido al final del tratamiento (6 meses), con respecto al obtenido en la madera después de 3 meses de exposición, aumentó en un 13,18 % para la albura de 6 años, un 9,84 % para el duramen de 6 años, un 9,87 % para la albura de 10 años y un 3,2 % para el duramen de 10 años

(Cuadro 8, Fig. 45)

Cuadro 8. Solubilidad en NaOH al 1 % (%) para la albura y el duramen de teca de 6 y 10 años, después de 3 y 6 meses de exposición al hongo *Rigidoporus* sp.

Muestra	3 meses	6 meses	Diferencia (valores relativos)
Albura 6 años	9,71	10,99	13,18
Albura 10 años	9,92	10,90	9,87
Duramen 6 años	10,67	11,72	9,84
Duramen 10 años	13,41	13,84	3,2

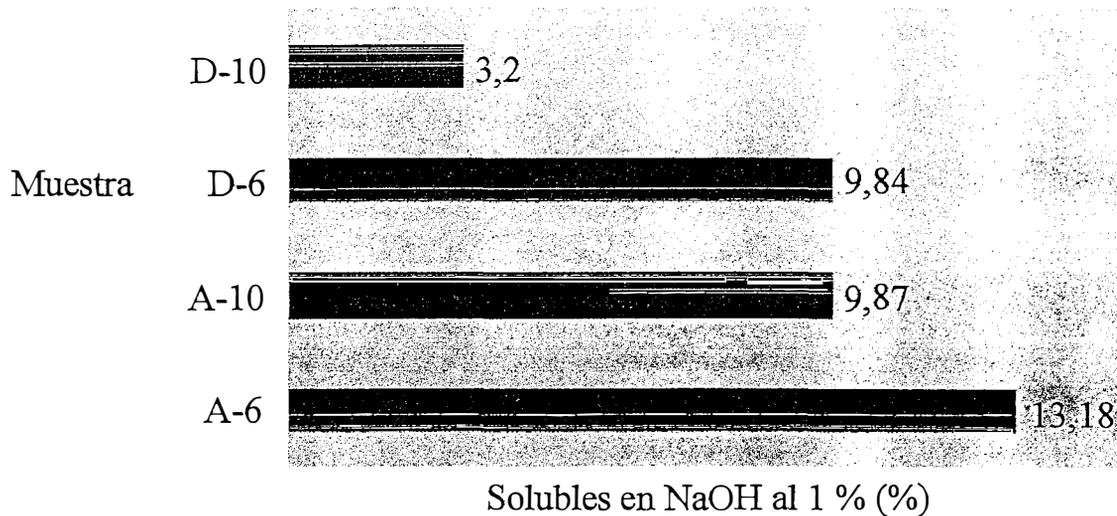


Fig. 45. Diferencia (valor relativo) de los solubles en NaOH al 1%, de la madera de teca, duramen de 10 años (D-10), duramen de 6 años (D-6), albura de 10 años (A-10), albura de 6 años (A-6), entre el tercer y sexto mes de exposición.

El aumento de los solubles en NaOH al 1%, (del tercer al sexto mes) fue mayor en las muestras de albura de 6 años (13,18%) y menor en el duramen de 10 años (3,2%); la madera de albura de 10 años y duramen de 6 años perdieron un porcentaje similar, 9,87% y 9,84 %, respectivamente.

La cantidad de lignina aumentó en todos los tratamientos y varió de 28,75% a 33,45% para la albura de 6 años, de 26,71 % a 28,13 % para el duramen de 6 años, de 27,82% a 31,33 % para la albura de 10 años y de 25,4% a 29% para el duramen de 10 años (Cuadro 9).

Cuadro 9. Contenido de lignina (%) para la albura y el duramen de teca de 6 y 10 años después de 3 y 6 meses de exposición al hongo *Rigidoporus* sp.

Muestra	3 meses	6 meses	Diferencia
Albura 6 años	28,75	33,45	4,7
Albura 10 años	27,82	31,33	3,51
Duramen 6 años	26,71	28,13	1,42
Duramen 10 años	25,4	29	3,6

DISCUSIÓN

De acuerdo con los resultados obtenidos en esta investigación, el hongo, *Rigidoporus* sp. aparentemente produce una podredumbre blanca del tipo simultánea, podredumbre que se caracteriza porque el hongo utiliza los tres componentes de la pared celular al mismo tiempo. Esto se dedujo al observar el crecimiento hifal y la subsecuente degradación de las paredes, donde aparecen erosiones tipo “surco” (Fig. 31) y en las cuales la hifa parece hundirse, estos resultados concuerdan con lo comunicado por Schwarze *et al.* (2000).

Se ha mencionado que una de las vías utilizadas por el hongo para penetrar al interior de los tejidos son las punteaduras (Schwarze *et al.* 2000). En este estudio fue posible observar la entrada de hifas por punteaduras tanto de fibras como de elementos del vaso. Aparentemente la degradación de la madera empieza en el parénquima radial, el cual es muy abundante en esta especie y es donde se encuentran los compuestos simples como azúcares y almidones de bajo peso molecular (Flores 1999), que pueden ser importantes como fuentes iniciales de carbohidratos que ayudan en el establecimiento de los hongos en la madera (Kent 1973). Una vez removidos los rayos parenquimatosos las fibras quedan sueltas y se observa una fuerte desintegración de las estructuras. Estos daños fueron más evidentes en las muestras de madera de albura de 6 años (Fig. 22).

Al observar los cortes de madera al microscopio, se notó que los elementos del vaso son luego degradados ya que se encontró gran cantidad de hifas en las paredes de estas estructuras (Figs. 23, 28); es muy posible que el hongo utilice los vasos como vías para

distribuirse dentro de la madera. Las fibras pueden ser las últimas estructuras usadas por el hongo en el proceso de explotación del sustrato, porque aunque se les observó sueltas debido al desacomodo provocado por la ausencia de parénquima, no fue posible observar en ellas daño evidente.

Desde las primeras semanas de exposición de la madera al hongo, se observó un rápido crecimiento y colonización, en la mayoría de las muestras de madera, este rápido crecimiento se pudo haber debido a las condiciones ambientales favorables presentes, como lo fueron la humedad y temperatura óptima (~ 26 °C) y la ausencia de competidores. Sin embargo, la cantidad de hifas presentes en el sustrato no aseguró una colonización y explotación efectiva del sustrato, como ha sido comunicado por otros investigadores González y Icochea (1981) y como se observó en este estudio, ya que no hubo iguales pérdidas de masa en todos los casos. Las muestras de madera fueron cubiertas en su mayoría por abundante micelio (conjunto de hifas), pero no fue sino en la albura de 6 años que se observó una degradación severa de la pared y donde se obtuvieron las mayores pérdidas de masa; el duramen de 10 años no mostró ningún tipo de degradación aún después de 6 meses de exposición y las pérdidas de masa fueron muy bajas.

La teca es considerada como una especie maderable resistente a la mayoría de los patógenos tanto en plantaciones como en bosques naturales o durante su almacenamiento (Chaves 1991). Esta resistencia se comprobó en este estudio, ya que las pérdidas de masa (base seca) máximas durante el período de estudio (6 meses) fueron bajas, y solo variaron de 7,96% a 5,76% para la albura de 6 y 10 años y de 5,99% a 1,62% para la madera de duramen de 6 y 10 años respectivamente. Se observó solo una ligera variación en los porcentajes de pérdidas de masa (base seca) obtenidos en este estudio con respecto a los

porcentajes obtenidos por Canessa (1988). A pesar de que este investigador no utilizó ningún hongo que haya sido comunicado como causante de podredumbre en la teca, sus resultados coinciden con los obtenidos en este trabajo.

Esto podría indicar que aunque se utilicen diferentes especies de hongos, la madera de teca siempre muestra resistencia, principalmente en el duramen de mayor edad, lo cual podría deberse a la cantidad de compuestos orgánicos, como aceites, resinas, gomas, taninos, sustancias aromáticas y pigmentos que se acumulan en la pared celular del duramen, los cuales actúan como preservantes naturales (Scheffer 1973, Hart y Shrimptom 1978, Shain 1979, Canessa 1988, Flores 1999). La albura en la mayoría de las especies carece de estos compuestos tóxicos y es más vulnerable al ataque.

La albura de 10 y el duramen de 6 años perdieron aproximadamente el mismo porcentaje de masa (base seca), no hubo diferencias significativas entre ambos, en cuanto a los porcentajes de pérdidas, esto puede deberse a que la albura adquiere cierta resistencia a la podredumbre con la edad semejante a la que presenta el duramen de 6 años.

No se encontró una tendencia definida en la variación que experimentó la densidad de la madera en los diferentes tipos de madera (albura y duramen de 6 y 10 años) sin tratamiento biológico, los valores más bajos (0,49 y 0,51) correspondieron a la madera de 6 años y los más altos (0,53 y 0,61) a la madera de 10 años. Sin embargo, el duramen de 10 años fue el más denso, lo que podría sugerir que la densidad de la madera influye en la resistencia. Canessa (1988) argumenta que esto no es necesariamente cierto, ya que existen maderas livianas, tales como la del Botarramas (*Vochysia ferruginea*) que se clasifican entre las maderas durables, pero hay otras como la del Gallinazo (*Schtyzolobium paraibum*) que son relativamente pesadas y su duramen presenta menor resistencia. Esto conduce a pensar que

la durabilidad más alta de algunas maderas (que incluyen aquellas de baja densidad) puede deberse principalmente a la acumulación de compuestos tóxicos en el duramen que inhiben el establecimiento de microorganismos, como se mencionó anteriormente.

Se ha señalado que en general existe una tendencia en maderas de alta densidad a resistir inicialmente la acción de los hongos de podredumbre, pero que en la medida en que esta progresa, esta resistencia se hace nula y en algunos casos adquiere proporción inversa (Donoso y Edison 1968), debido probablemente a una modificación del sustrato provocado por el hongo.

Uno de los aspectos que en su momento pudo haber afectado al hongo negativamente en su establecimiento y explotación inicial de la madera, pudo haber sido la pérdida de algunos componentes en la fase de esterilización, ya que las muestras de madera al ser sometidas a esta fase, antes de exponerlas al agente biológico, perdieron componentes tales como: componentes inorgánicos, taninos, gomas, azúcares, materiales colorantes y almidones, los cuales pueden ser importantes como fuentes iniciales de carbono para el establecimiento de microorganismos en la madera (Kent 1973).

Los resultados obtenidos en el ensayo mecánico (compresión paralela al grano) demuestran que la madera de 10 años, cuyas células poseen paredes celulares más lignificadas, es más resistente a la compresión, en comparación con la madera de 6 años la cual alcanzó valores de esfuerzo menores tanto para la albura como para el duramen.

Las pruebas con las muestras testigo de albura y duramen de 6 años dieron resultados similares para la resistencia a la compresión (600 kg/cm^2 y 624 kg/cm^2). El duramen de 6 y la albura de 10 años (con una resistencia de 760 kg/cm^2), presentaron pérdidas de esfuerzo significativas hasta el sexto mes de exposición. Esto al igual que los resultados anteriores,

se puede atribuir al contenido de extractos en el primero. Las pérdidas de masa en la madera de albura de 10 años fueron similares a las del duramen de 6 años.

La pérdida de masa (mayor daño en la pared celular) y la pérdida de resistencia a la compresión, sobretodo en la albura de 6 años por acción del hongo, se puede relacionar con su mayor susceptibilidad al ataque.

En cuanto a las variaciones en los contenidos químicos, este hongo evidentemente tuvo preferencia por carbohidratos de bajo peso molecular; los solubles en NaOH al 1% aumentaron en todos los tratamientos, lo que indica la degradación de celulosa y hemicelulosas, ya que la cantidad de carbohidratos de bajo peso molecular aumenta por la fragmentación de las cadenas de estos polímeros en las paredes celulares.

La lignina reflejó un aumento en la variable, lo que representó una evidencia química de que existen modificaciones en la estructura celular. Este aumento podría interpretarse como que un aumento en la degradación de celulosa y hemicelulosa provoca un aumento numérico en el contenido de lignina.

Las diferencias con respecto a los demás ensayos; de pérdidas de masa y de pérdidas de resistencia a la compresión, coinciden con estos resultados. Se observó claramente que en la madera de albura de 6 años, se dan las mayores pérdidas de masa (base seca), de compuestos químicos, de resistencia y que además es en ella donde se presenta un mayor daño estructural en la pared; en los demás tratamientos estas variables se relacionan directamente.

CONCLUSIONES

- La madera, es un material que por sus características generales exhibe variaciones múltiples, tanto en su anatomía, como en su composición química. Su resistencia al ataque de los hongos es un ejemplo típico de esta variabilidad.
- El hongo *Rigidoporus* sp. produce en la madera de teca podredumbre blanca del tipo simultánea.
- La madera de teca se considera como una madera altamente resistente al ataque ocasionado por *Rigidoporus* sp.
- La resistencia a la podredumbre se relaciona posiblemente con la cantidad de extractos contenidos en la madera, principalmente en el duramen.
- La pérdida de masa, el daño en la pared celular y la pérdida de resistencia a la compresión, sobre todo de la albura de 6 años, se puede relacionar con su mayor susceptibilidad al ataque biológico.
- Las vías usadas por el hongo para penetrar e invadir el sustrato son las punteduras y las elementos de vaso.
- El parénquima radial es el primer tejido degradado, esto provoca un desacomodo de los tejidos adyacentes.
- La simulación de condiciones en el laboratorio, son distintas a las condiciones que se presentan en el campo; donde además de los hongos interaccionan otros organismos.

- Los estudios sobre durabilidad ayudan a determinar el tiempo durante el cual se mantienen vigentes las propiedades físicas y mecánicas de la madera, lo que podría permitir un mejor aprovechamiento de las especies vegetales o recomendar el uso de técnicas de preservación a las especies que así lo requieran.
- Las maderas que exhiben una alta durabilidad natural, representan especies potenciales para su uso industrial, ya que podrían extraerse de ellas los extractos para ser utilizados en maderas susceptibles al ataque de hongos.

BIBLIOGRAFÍA

- Anónimo. 1992. American Society for Testing and materials. Annual Book of ASTM Standards Wood. USA. Vol. 04.09
- Agrios, G. 1996. Fitopatología. LIMUSA. México DF. 838 p.
- Alexopoulos, C., Mims C. y M. Blackwell. 1996. Introductory Mycology. John Wiley and Sons, Inc. New York. U.S.A. 869 p.
- Alfaro, M. 1999. Producción forestal en Costa Rica: perspectivas y limitaciones. pp 467 – 470 En: Memorias XI Congreso Nacional Agronómico y de Recursos Naturales.
- Araya, B. 1998. Financiamiento de bosques y plantaciones forestales: pago de servicios ambientales. Revista Forestal Centroamericana (22): 13 – 20.
- Arguedas, M. 1996. Inventario de enfermedades de especies forestales en Costa Rica. Revista Forestal Centroamericana 5 (15): 20 – 24.
- Blanco, L. 1998. Procedimientos de ensayo de la sección de química de la madera. Laboratorio de Productos Forestales. Universidad de Costa Rica. Costa Rica.
- Blanchette, R. 1980. Wood decay: a submicroscopic view. Journal of Forestry 78(12): 734 – 737.
- Blanchette, R. 1984. Selective Delignification of Eastern Hemlock by *Ganoderma tsugae*. Phytopathology 74: 153 – 160.
- Bracamonte, L., Holmquist O. y A. Cadenas. 1998. Macromicetos xilófagos de las plantaciones de pino del oriente de Venezuela. Parte 1. Rev. Forest. Venez. 42 (1): 25 – 33.

- Bracamonte, L., Holmquist O., Cadenas A. y S. Gil. 1996. Hongos xilófagos sobre *Cupressus lusitanica* Mill. en Mérida, Venezuela. Rev. Forest. Venez. 40 (1): 27-36.
- Calvo, J. 1998. Impacto de la reforestación. Simposio Conservación del Bosque en Costa Rica (memoria). Academia Nacional de Ciencias. San José. Costa Rica. 278 p.
- Canessa, E. 1988. Resistencia a la pudrición de seis especies maderables de plantación. ITCR. San José. Costa Rica. 64 p.
- Carpio, I. 1992. Manual de procedimientos para la sección de Anatomía y Morfología de la madera. Laboratorio de Productos Forestales. INII – 77 – 92. Universidad de Costa Rica. San José. Costa Rica. 20 p.
- Carpio, I. 1995. Maderas de Costa Rica, 150 especies forestales. Editorial de la Universidad de Costa Rica. San José. Costa Rica. 338 p.
- Carpio, I. 1997. Análisis morfométricos de fibras vegetales. LPF-AN-001. Laboratorio de Productos Forestales. Universidad de Costa Rica. San José. Costa Rica.
- Carranza, J. 1984. Isolation, Identification and Roles of Fungi from Creosote Treated Pine Poles. Turrialba. 34 (4): 489 – 501.
- Carranza, J. 1991. Pore fungi of Costa Rica I. Mycotaxon. 41 (2): 345 – 370.
- Carranza, J. 1992. Pore fungi of Costa Rica II. Mycotaxon. 43: 351 – 369.
- Carranza, J. 1993. Pore fungi of Costa Rica III. Mycotaxon. 48: 45 – 57.
- Carranza, J. 1996. Distribution of pore fungi (*Aphylllophorales: Basidiomycotina*) in the biotic units of Costa Rica. Rev. Biol. Trop. 44 (4): 103 – 109.
- Carranza, J y L. Ryvardeen. 1998. Additional list of pore fungi of Costa Rica. Mycotaxon. 69: 377 – 390.

- CCT. 1993. Informe sobre el mapa de capacidad de uso de las tierras forestales de Costa Rica, Escala 1:50 000. Centro Científico Tropical – Fundación Neotrópica. San José, Costa Rica. 50 p.
- Chaves, E y W. Fonseca. 1991. Teca (*Tectona grandis*) árbol de uso múltiple en América Central. Informe técnico N° 179. CATIE, Turrialba, Costa Rica. 60 p.
- Darrel, D. (Ed.). 1973. Wood Deterioration and its prevention by Preservative Treatments Vol. I. Degradation and Protection of Wood. Syracuse Wood Science Series. New York, U.S.A. 380 p.
- De Camino, R. 1998. ¿Son las plantaciones un negocio rentable? Conservación del Bosque en Costa Rica (memoria). Academia Nacional de Ciencias. San José, Costa Rica. 278 p.
- Dobry, J., Dziurzynski A. y V. Rypacek. 1986. Relation between combustion heat and chemical wood composition during white and brown rot. Wood Sci. Technol. 20: 137 – 144.
- Donoso, J y E Veloso. 1968. Durabilidad natural de la madera de algunas especies forestales de interés comercial en nuestro país. Escuela de Ingeniería Forestal, Universidad de Chile, Chile. Mimeografiado. 29 p.
- Esau, E. 1976. Anatomía Vegetal. Ediciones Omega. Barcelona. España. 779 p.
- Escuza, P y F. Trujillo. 1989. Durabilidad natural de cinco especies forestales de la Amazonía Peruana. Rev. For. del Perú 16 (1) 1 – 10.
- Eslyn, W., Kirk T. y M. Effland. 1975. Changes in the composition of wood caused by six soft-rot fungi. Phytopathology 65: 473 – 476.

- Flores, E. 1999. La planta: Estructura y función. Vol. 1. Libro Universitario Regional. Cartago, Costa Rica. 367 p.
- Gilbertson, R y L. Ryvarden. 1987. North American Polyporus. Vol 2. Fungiflora. Oslo.
- Goldstein, I. 1979. Productos químicos derivados de la madera. Revista Internacional de Silvicultura e Industrias Forestales 31(125): 2 – 9.
- Gómez, M., Echenique R. y R. Salinas. 1969. Índices de Laboratorio sobre Resistencia de la Madera a la Pudrición de once Especies Forestales Mexicanas. U.N.A.M. México D.F, México. 40 p.
- Gómez, M., Shultz S. y O. Ramírez. 1997. Contribución de las plantaciones forestales a las cuentas forestales, Costa Rica. Revista Forestal Centroamericana 6 (18): 23 – 27 p.
- González, F y A. Icochea. 1981. Pudrición de la madera de 10 especies forestales por acción de cinco hongos xilófagos. Rev. For. del Perú. 10 (1 – 2): 102-137.
- González, G., Bonilla L. y D. Rivera. 1979. Propiedades y usos de la madera de teca (*Tectona grandis* L.) creciendo en Quepos, Costa Rica. Laboratorio de Productos Forestales UCR. San José, Costa Rica. 7 p.
- Hart, J y D. Shrimpton. 1978. Role of Stilbenes in Resistance of wood to decay. Symposium: on Wood Decay in Living Trees. Mechanisms of Tree Defence and Wood Decay. Phytopathology. 69 (10): 1138 – 1143.
- Herrera, J., Gómez M. y A. Herrera. (sin año). Durabilidad natural de la madera de especies forestales mexicanas. Índice de durabilidad natural de quince especies forestales. Bol. Técn. Inst. Nac. Invest. For. 51 México D.F, México. 21 p.
- Holmquist, O. 1990. La pudrición del duramen de los árboles en pie en Venezuela. El caso de la Mora de la Guayana. Rev. For. Venez. 24 (34): 79 – 88 .

- Karnovsky, M. 1965. A Formaldehyde – Glutaraldehyde fixative of high Osmolarity for use in electron microscopy. J. Cell. Biol. 27:137 a.
- Kent, T. 1973. The Chemistry and Biochemistry of decay. pp 149 – 181. In: Wood Deterioration and its Prevention by Preservative Treatments Vol. I. Degradation and Protection of Wood. Syracuse Wood Science Series. New York, U.S.A.
- Lavagni E. 1982. Aislamiento e identificación de hongos de maderas tropicales tratadas con pentaclorofenol en Turrialba. Tesis de Licenciatura. Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.
- Liese, W. 1970. Ultrastructural aspects of woody tissue desintegration. Ann Rev. Phytopathol. 8: 231 – 258.
- Mavillo, R y O. Holmquist. 1995. “*Pulvifomes fastuosus*(Lév). Holmquist (Basidiomicetes, Polyporaceae) asociado a la pudrición del duramen del caramacate (*Piranhea longipedunculata*) y de la mora (*Mora gonggrijpii*)”. Rev. For. Venez. 39 (2): 32 – 66.
- Moya, R. 2001. Propiedades de la madera de Teca (*Tectona grandis*) perteneciente a la Reforestadora el Buen Precio S.A. (Boletín) Instituto Tecnológico de Costa Rica. 1 (1) 7 p.
- Otjen, L y A. Blanchette. 1986. A discussion of microstructural changes in wood during decomposition by white rot basidiomicetes. Can. J. Bot. 64: 905 - 911.
- Pérez, V., Heras G. y R. Echenique. 1977. Madera y su uso en la construcción, Riesgos a la pudrición de la madera en diferentes climas de México. Instituto de Investigaciones sobre Recursos Bióticos A.C. Veracruz, México. 11 p.

- Rivera, L., Quintanar A. y C. Pérez. 1999. Comparación histoquímica de albura y duramen de tres especies de *Quercus*. *Madera y Bosque* 5(1): 27 – 41.
- Rodríguez, J. 1998. *Patología de la madera*. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España. 349 p.
- Rodríguez, J., Ferraz A., Nogueira R., Ferrer I., Esposito E. y N. Durán. 1997. Lignin biodegradation by Ascomicete *Chrysonilia sitophilia*. *Applied Biochemistry and Biotechnology* 62: 233 – 242.
- Rodríguez, M. 1979. Evaluación de la durabilidad natural del laurel (*Cordia alliodora*) y el jaúl (*Alnus acuminata*) con pruebas aceleradas de laboratorio. Departamento de Ingeniería en maderas. ITCR.
- Ross, P. 1958. Teak in Trinidad. *Economic Botany*. 13 (1): 30 – 40.
- Ruiz-Boyer, A. 1998. La familia Ganodermataceae (Aphylophorales) en Costa Rica. *Brenesia* 49-50:21-37.
- Ruiz-Boyer, A. y J. Carranza. 1996. Dos nuevos registros de Aphylophorales (Basidiomycotina) para Costa Rica. *Rev. Biol. Trop.* 44 (4):151.
- Ryan, P. 1982. The management of Burmese teak forests. *Commonwealth Forestry Review*. 61 (2): 115 – 120.
- Sachs, I., Leatham G., Myers G. y T. Wegner. 1990. Distinguishing characteristics of biomechanical pulp. *Biotechnology*. September *Tappi Journal*. Madison. 249 – 254.
- Sage, L y R Quiros. 2001. Proyección del volumen de madera para aserrío proveniente de las plantaciones de melina y teca y de otras fuentes (documento técnico). FONAFIFO –San José, Costa Rica. 24 p.

- Sánchez, E. (Traductor). 1998. Traducción de norma ASTM – D143. Laboratorio de Productos Forestales. Universidad de Costa Rica, Costa Rica. pp. 16 – 19.
- Sánchez, R. 1980. Macromicetes patógenos y destructores de la madera en los bosques de la meseta Tarasca, Mich. (INIF) Rev. Ciencia Forestal 5 (23) 3-19.
- Sarmiento, M. y E. Vázquez. 1984. Incidencia de hongos xilófagos en estacas de especies forestales tropicales. (INIF) Rev. Ciencia Forestal 9 (51): 39-50.
- Scheffer, T. 1973. Microbiological degradation and the causal organisms. pp 31-103
In: Wood Deterioration and its Prevention by Preservative Treatments Vol. I. Degradation and Protection of Wood. Syracuse Wood Science Series. New York.
- Schwarze, E., Engels J. y C. Mattheck. 2000. Fungal Strategies of Wood Decay in Trees. Springer-Verlag. Berlin Heidelberg New York, U.S.A. 185 p.
- Shain, L. 1979. Dynamic Responses of Differentiated Sapwood to Injury and Infection. Phytopathology 69 (10): 1143-1147.
- StatSoft, Inc. 1995. STATISTICA for Windows [Computer program manual]. Tulsa, OK: StatSoft, Inc., 2300 East 14th Street, Tulsa, OK, 74104-4442, (918) 749-1119, fax: (918) 749-2217, e-mail: info@statsoft.com, WEB: <http://www.statsoft.com>.
- Szklarz, G. y R. Antibus. 1989. Production of phenol oxidases and peroxidases by Wood-Rotting Fungi. Mycologia 81(2): 234 – 240.
- Utting, P. 1996. Bosques, sociedad y poder. Universidad Centroamericana. UNRISD. Managua. 189 p.
- Weaver, P. 1993. *Tectona grandis* L.f. Teak. SO-ITF-SM-64. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Forest Experimental Station. New Orleans U.S.A. 18 p.

Wolf, F. y F. Perales. 1985. Durabilidad Natural de la Madera de algunas especies del
Matorral del Noreste de México. Universidad Autónoma de Nuevo León. Linares N.L.

15 p.