

X
TA423
N67

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES Y AMBIENTALES
CENTRO DE ESTUDIOS FORESTALES Y AMBIENTALES DE POSTGRADO
PROGRAMA TECNOLOGÍA DE PRODUCTOS FORESTALES

EFFECTOS DEL ATAQUE DE HONGOS DE PUDRICIÓN
MARRÓN Y BLANCA SOBRE LA DURABILIDAD
NATURAL E INDUCIDA DE TRES MADERAS
VENEZOLANAS

WWW.BDIGITAL.ULA.VE



ING. FOR. NÉSTOR MORA R.

TUTOR: DR. OSVALDO ENCINAS B.

TRABAJO PRESENTADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA OPTAR AL GRADO
DE MAGISTER SCIENTIAE EN TECNOLOGÍA DE PRODUCTOS FORESTALES



MÉRIDA - VENEZUELA

SEPTIEMBRE 1998

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

CONTENIDO

	Páginas
Agradecimiento	i
Resumen	ii
Abstrac	iii
Lista de figuras	iv
I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS	3
2.1. Objetivo general	3
2.2. Objetivos específicos	3
III. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	4
3.1. La madera. Componentes estructurales de la pared celular	4
3.1.1. Ultraestructura de la pared celular	7
3.2. Degradación de la madera por microorganismos	8
3.3. Durabilidad natural de la madera	12
3.3.1. Métodos para medir la durabilidad natural de la madera	13
3.3.2. Pérdida de peso	14
3.3.3. Patrones de degradación de la madera por los hongos	16
IV. MATERIALES Y MÉTODOS	18
4.1. Materiales	18
4.2. Métodos	19
V. RESULTADOS	23
5.1. Crecimiento miceliar en las cápsulas de Petri	23
5.2. Colonización de los bloques de madera por los hongos	23
5.3. Pérdida de peso	27

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

5.3.1. Observaciones sobre pino caribe	27
5.3.2. Observaciones sobre drago	28
5.3.3. Observaciones sobre curarire	29
5.4. Variaciones en el contenido de humedad	30
5.5. Patrones de crecimiento	32
5.5.1. Observaciones sobre pino caribe	32
5.5.2. Observaciones sobre drago	38
5.5.3. Observaciones sobre curarire	42
 VI. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN	 43
6.1. Colonización de los bloques de madera	43
6.2. Contenido de humedad	44
6.3. Pérdida de peso	47
6.4. Patrones de crecimiento	52
 VII. CONCLUSIONES	 57
 VIII. RECOMENDACIONES	 59
 IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	 60
 ANEXOS	 67
 GLOSARIO	 80

Agradecimiento

Al Laboratorio Nacional de Productos Forestales (LNPF) por el aporte financiero y de sus instalaciones, sin los cuales no hubiera sido posible la realización de este trabajo.

Al Dr. Osvaldo Encinas B. por brindarme la oportunidad de introducirme en el fascinante mundo de la Microbiología de Maderas, así como por su acertada conducción y asesoramiento de la presente investigación.

Al Consejo de Estudios de Postgrado de la Universidad de los Andes, por la beca otorgada para cursar estudios de cuarto nivel y por su aporte financiero para la publicación de esta tesis.

A las Secciones de Conservación de Maderas, Pulpa y Papel y Patología Forestal del Laboratorio Nacional de Productos Forestales, así como al Laboratorio de Anatomía de Maderas de la Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales por su colaboración prestada.

Al Instituto para el Desarrollo Forestal (IDENFOR) Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales por facilitarme la madera de pino caribe utilizada en esta investigación.

A los ingenieros Pablo Moreno, Pablo Ninin, Antonio Aguilera y al Per. For. Pietro Antonio por su valiosa colaboración.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Resumen

Un hongo de pudrición marrón, *Gloeophyllum trabeum* y dos hongos de pudrición blanca, *Trametes versicolor* y *Pycnoporus sanguineus* fueron utilizados para determinar la durabilidad natural y la durabilidad inducida mediante el uso del preservante hidrosoluble CCA de tres maderas, una conífera, *Pinus caribaea* var. *hondurensis* (pino caribe) y dos latifoliadas, *Pterocarpus acapulcensis* (drago) y *Tabebuia serratifolia* (curarire), siguiendo la metodología según la Norma Norteamericana ASTM (D-1413) E10-91 (soil/block). La durabilidad fue determinada mediante pérdida de peso y estudio de las características de degradación de los hongos, durante cuatro meses de incubación en las maderas. La madera de pino caribe fue más susceptible al ataque de *G. trabeum*, el cual generó el mayor porcentaje de pérdida de peso (50,84 %); en la madera de drago la mayor pérdida de peso fue causada por *T. versicolor* (53,32 %). La madera de curarire fue resistente al ataque de los tres hongos, presentando valores de pérdida de peso inferiores al 2 %. Las maderas tratadas con CCA no experimentaron pérdida de peso. Los patrones de degradación de los hongos en la madera fueron determinados usando microscopio óptico bajo campo brillante y luz polarizada. *G. trabeum* causó colapso de la pared celular en las maderas de pino caribe y drago, mientras que *T. versicolor* y *P. sanguineus* causaron erosión gradual desde el lumen hacia la lámina media, produciendo disminución del espesor de las paredes celulares. Aún cuando los hongos fueron capaces de colonizar la madera de curarire, éstos no generaron ningún tipo de degradación de los componentes de la pared celular. Las muestras de madera tratadas con sales CCA no fueron atacadas por los hongos, mostrando excelente protección.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Abstrac

A brown-rot fungi, *G. trabeum* and two white-rot fungi *T. versicolor* and *P. sanguineus* were used for study of the natural durability and induce durability through waterborn preservative CCA of three woods. The softwood *Pinus caribaea* var. *hondurensis* (caribbean pine) and two hardwoods *Pterocarpus acapulcensis* (drago) and *Tabebuia serratifolia* (curarire), were tested following the American Standard (ASTM D-1413) E10-91 (soil/block). The amount of weight loss and the pathway during four months of incubation were used. The caribbean pine wood was more susceptible to attack of *G. trabeum* producing biggest weight loss (50,84 %). In drago wood, biggest weight loss percent was caused by *T. versicolor* (53,32 %), whereas curarire wood was resisted to all three fungi causing however minimal weight loss values (less than 2 %). The CCA treated samples had not weight losses. The pathway of fungi attack was studied using light microscopy by either bright-field or polarized light; *G. trabeum* caused wall cell collapse in caribbean pine and drago woods, whereas *T. versicolor* and *P. sanguineus* caused gradual erosion from the lumen towards middle lamella, producing the thickening of the wood cell walls. Although the fungi were able to colonize the curarire wood, don't cause degradation of wood cell wall. The wood samples treated whit CCA salts were not attacked by the fungi, showins excellent protection.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Lista de figuras	Páginas
Fig. 1. Estructura anatómica de madera coníferas	5
Fig. 2. Estructura anatómica de madera latifoliadas	5
Fig. 3. Estructura general de la pared celular	8
Fig. 4. Detalle de frascos o cámaras de pudrición	22
Fig. 5. Disposición de los frascos dentro del cuarto de acondicionamiento durante el período de incubación	22
Fig. 6. Desarrollo del micelio de <i>G. trabeum</i> sobre las maderas no tratadas de pino caribe, drago y curarire	25
Fig. 7. Desarrollo del micelio de <i>T. versicolor</i> sobre las maderas no tratadas de pino caribe, drago y curarire	26
Fig. 8. Porcentajes de pérdida de peso producidos por <i>G. trabeum</i> , <i>T. versicolor</i> y <i>P. sanguineus</i> sobre madera de pino caribe	27
Fig. 9. Porcentajes de pérdida de peso producidos por <i>G. trabeum</i> , <i>T. versicolor</i> y <i>P. sanguineus</i> sobre madera de drago	28
Fig. 10. Porcentajes de pérdida de peso producidos por <i>G. trabeum</i> , <i>T. versicolor</i> y <i>P. sanguineus</i> sobre madera de curarire	29
Fig. 11. Variaciones en el contenido de humedad de las maderas de pino caribe, drago y curarire sin tratamiento químico y las preservadas con 5 % de sales CCA durante cuatro meses de incubación	31
Fig. 12. Colonización de la madera de pino caribe por <i>G. trabeum</i> después de 1 mes de incubación	33
Fig. 13. Degradación de la pared celular de la madera de pino caribe causadas por <i>G. trabeum</i>	34
Fig. 14. Producción de agujeros de penetración en madera de pino caribe atacada por <i>T. versicolor</i> después de 4 meses de incubación.	36
Fig. 15. Destrucción total del parénquima radial en madera de pino caribe después de 1 mes de incubación con <i>P. sanguineus</i>	37

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - ^{iv}Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Fig. 16. Erosión gradual desde el lumen hacia la lámina media causada por <i>P. sanguineus</i> en madera de pino caribe después de 1 mes de incubación	38
Fig. 17. Erosión de la capa S ₂ de la pared celular y células del parénquima radial causados por <i>G. trabeum</i> en madera de drago después de 4 meses de incubación	39
Fig. 18. Disminución del espesor de la pared celular y presencia de hifas dentro de las cavidades celulares en madera de drago después de 4 meses de incubación con <i>T. versicolor</i>	41
Fig. 19. Correlación entre pérdida de peso y contenido de humedad para las maderas de pino caribe, drago y curarire no tratadas	46
Fig. 20. Efectos de medias para valores de porcentaje de pérdida de peso	47
Fig. 21. Interacción entre factores para la variable pérdida de peso	50

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

I. INTRODUCCIÓN

La madera ha desempeñado un papel muy importante en el avance de la raza humana, el hombre ha utilizado desde tiempos inmemorables este material renovable para satisfacer gran parte de sus necesidades empleándola en la construcción de viviendas, muebles, postes, pilotes marinos, durmientes para ferrocarriles, fabricación de papel, combustible, entre otros usos. Dentro de los materiales estructurales básicos importantes, es uno de los más abundantes aunque permanece poco conocido en algunas de sus propiedades. Muchas personas saben lo que es la madera; sin embargo, pocas tienen el conocimiento real de su estructura, sus propiedades y sus múltiples usos.

A pesar de sus excelentes propiedades y múltiples usos, debido a su origen orgánico, la madera es susceptible a la degradación por procesos biológicos naturales, los organismos animales y vegetales acuden a ella, bien sea en busca de alimento o como un lugar seguro para completar sus ciclos de vida. Entre los numerosos agentes de biodegradación de la madera, los hongos xilófagos juegan un papel muy importante, ya que tienen la capacidad de degradar enzimáticamente alguno o todos los componentes principales de la madera: celulosa, hemicelulosa y lignina. Sin embargo, la degradación biológica de la madera puede ser controlada por diferentes métodos, dentro de los cuales se encuentra la preservación, que dependiendo del tipo de preservante y la técnica de aplicación utilizada, produce una durabilidad inducida a diferentes niveles de protección.

Basándose en este principio, la industria de la madera preservada ha ingresado con gran éxito al mercado mundial, y la mayoría de los usuarios se han convencido que no se puede esperar una larga duración de una pieza de madera, si ésta no ha sido tratada con preservantes para protegerla, no sólo de los hongos que causan la pudrición, sino también de insectos xilófagos, bacterias y perforadores marinos, entre los agentes biológicos, así como también para protegerla del fuego, desgaste mecánico y exposición a los factores climáticos. A medida que las técnicas de la preservación se han ido perfeccionando, la madera ha adquirido mayores posibilidades de uso, permitiendo su empleo hasta en

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

condiciones muy severas, especialmente en zonas tropicales donde las condiciones climáticas favorecen la biodegradación de las maderas. En consecuencia, la madera preservada es considerada hoy día como un material de larga duración, capaz de competir satisfactoriamente con maderas de alta durabilidad natural, así como con otros materiales sustitutivos.

Para conocer y definir las mejores técnicas de conservación de maderas, incluidos los estudios de durabilidad inducida, se recurre al estudio de las características de ataque de los microorganismos en la madera, lo que permite conocer el grado de modificación y los cambios que se presentan en la estructura y ultraestructura de la madera, originando posteriormente pautas para recomendar las mejores técnicas y compuestos químicos apropiados para obtener una mayor durabilidad. La rama de la ciencia correspondiente es la microbiología de maderas, ciencia destinada al estudio de los procesos de biodeterioro de la madera, y que ha sido ampliamente desarrollada en numerosos países, aunque en Venezuela sólo se están iniciando estudios. Se considera que esta investigación será de gran utilidad, por su condición de estudio pionero que dará paso a nuevos trabajos específicos sobre estudios de biodegradación de maderas.

Se han elegido tres maderas y tres hongos para estudiar desde el punto de vista de la microbiología de maderas, el efecto que producen las sales comerciales CCA, a diferentes concentraciones, en la durabilidad inducida de las maderas venezolanas que se consideran tienen alto potencial de utilización una vez mejorada su resistencia natural a los procesos de biodeterioro. En consecuencia, la mayor contribución de esta investigación será utilizar los resultados obtenidos en el área de la conservación de maderas, ya que los mecanismos de aplicación y la acción de los diversos preservantes no pueden ser plenamente entendidos sin un conocimiento real de los procesos de deterioro de la madera y las causas que los favorecen.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

II. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general:

Estudiar las consecuencias de los procesos de biodegradación de maderas con durabilidad natural e inducida, en tres maderas venezolanas pino caribe, drago y curarire durante un periodo de cuatro meses.

2.2. Objetivos específicos:

2.2.1. Determinar las pérdidas de peso originadas por el ataque de tres hongos de pudrición *Gloeophyllum trabeum*, *Trametes versicolor* y *Pycnoporus sanguineus* en la madera de tres especies forestales: curarire, con durabilidad natural reconocida, pino caribe y drago con durabilidad inducida mediante el uso de sales CCA.

2.2.2. Estudiar las características de degradación de las maderas de pino caribe, drago, y curarire, originadas por el ataque del hongo de pudrición marrón *Gloeophyllum trabeum* y de los hongos de pudrición blanca *Trametes versicolor* y *Pycnoporus sanguineus* a nivel estructural, utilizando microscopio de luz.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

III. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

3.1. La madera. Componentes estructurales de la pared celular

La madera es un material biológico, producto del proceso de la división celular del cambium vascular de las plantas superiores, el cual genera xilema (madera) hacia adentro y floema (corteza) hacia fuera (Panshin y de Zeeuw, 1970). La madera se caracteriza por presentar marcada complejidad en cuanto al tipo de células que constituyen su estructura. Para un mejor entendimiento de los procesos de biodegradación, es necesario conocer la estructura de la madera, enfatizando en los tipos, localización y proporción de los constituyentes químicos de la pared celular (Eriksson et al., 1990).

Desde el punto de vista de la anatomía de la madera, las características estructurales son diferentes para cada especie forestal, existiendo inclusive variabilidad entre árboles de una determinada especie y hasta dentro de un mismo árbol (Zabel y Morrell, 1992). En este sentido, hay una marcada diferencia entre coníferas (Fig. 1) y latifoliadas (Fig. 2); las maderas latifoliadas se caracterizan por la presencia de vasos, estructuras complejas dispuestas en forma de tubos que se extienden a lo largo del grano, es decir, en sentido del crecimiento longitudinal del tallo y están ausentes en las maderas coníferas, lo cual es la principal diferencia con las latifoliadas (Richradson, 1978). Las maderas de algunas coníferas poseen además conductos resiníferos, los cuales son espacios intercelulares tubulares, rodeados por células secretoras, denominadas epiteliis (Panshin y de Zeeuw, 1970). En cuanto al tipo de radios, en las maderas latifoliadas son más variables que en las coníferas, en las cuales son principalmente uniseriados, aunque éstos caracterizan también a ciertas latifoliadas, sin embargo, predominan los radios con más de dos células de ancho (Haygreen y Bowyer, 1994).

La cantidad de parénquima axial en las coníferas es muy escaso y en algunos casos está ausente como en el caso del género *Pinus* (Eaton y Hale, 1993). En las latifoliadas, el parénquima axial se presenta en proporciones muy variables, desde escaso hasta muy

abundante (Haygreen y Bowyer, 1994). Las punteaduras de los elementos prosenquimatosos difieren notablemente entre coníferas y latifoliadas. En las coníferas generalmente, las punteaduras se caracterizan por la presencia de una estructura denominada torus (Panshin y de Zeeuw, 1970).

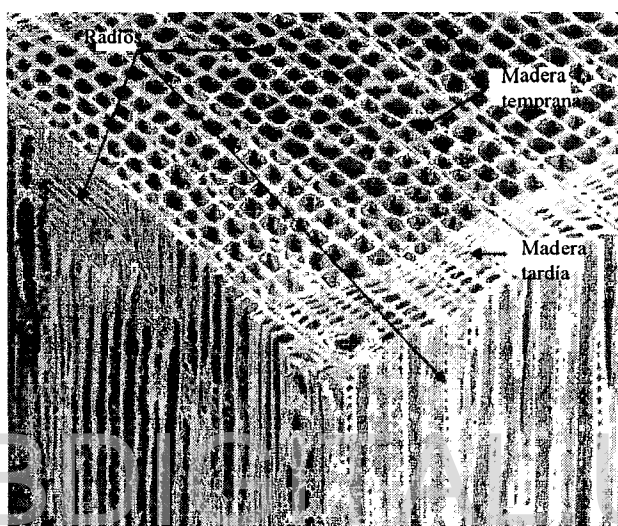


Fig. 1. Estructura anatómica de madera conífera (reproducido de Haygreen y Bowyer, 1994).

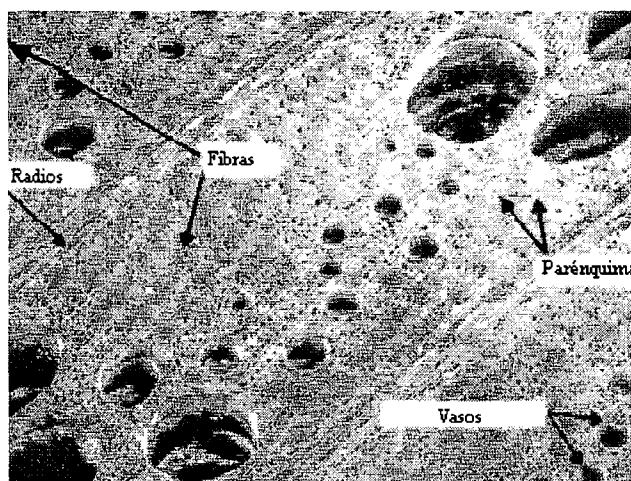


Fig. 2. Estructura anatómica de madera latifoliada (reproducido de Haygreen y Bowyer, 1994).

Las células de todas las maderas están compuestas por varias proporciones de celulosa, hemicelulosa y lignina (Kollmann y Côté, 1968). La celulosa forma un esqueleto el cual está rodeado por otras sustancias (hemicelulosas) funcionando como una matriz junto con los componentes de la lignina (Sjöström, 1991). La celulosa es quizás el más importante componente de la madera, constituye un poco menos de la mitad del peso en maderas latifoliadas y coníferas (40 – 44 %), está compuesta de unidades de glucosa $(C_6H_{10}O_5)_n$, unida a través de enlaces β - 1 - 4. El grado de polimerización (número de veces que se repite la unidad) puede llegar hasta 30000, siendo usualmente 10000 (Rayner y Boddy, 1988). Las hemicelulosas, son polímeros de bajo peso molecular, ramificados o rectos, compuestos principalmente de hexosas, pentosas o subunidades de ácido urónico, que ocurren en cantidades variables en maderas coníferas (25 – 30 %) del tipo glucomonanas y galactoglucomananas y maderas latifoliadas (25 – 40 %) del tipo xilanas. (Rayner y Boddy, 1988).

La lignina por otra parte, es un polímero de unidades de fenil propano, unidas entre sí por enlaces C-O-C y C-C (Kollmann y Côté, 1968). Aproximadamente una cuarta parte del peso de la madera consiste de lignina, su contenido es mayor en coníferas (25 - 35 %) que en maderas latifoliadas (18 - 35 %) (Rayner y Boddy, 1988). La unidad básica estructural de la lignina puede ser sustituida en dos o tres posiciones; la adición de un grupo metoxilo al anillo fenólico resulta en una unidad guayacil, mientras que la adición de dos grupos metoxilos resulta en una unidad siringil (Eriksson et al., 1990). En general, las maderas latifoliadas presentan solo lignina tipo guayacil, mientras que las coníferas presentan lignina del tipo guayacil y siringil (Highley, 1983).

Existen además, dentro de la composición química de la madera una menor cantidad de ciertos materiales extraños (2 - 10 %), mayormente en forma de extractivos orgánicos tales como taninos, flavonoides, estilbenos, terpenoides, almidones, lípidos, alcaloides, proteínas; así como cierta cantidad de minerales inorgánicos (0,1 - 1,0 %) (Preston y Jin, 1991).

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

3.1.2. Ultraestructura de la pared celular

En todas las especies de maderas las células que componen el sistema axial así como las que conforman el radial, están íntimamente integradas para producir un material rígido (Eaton y Hale, 1993). Las propiedades de resistencia de la madera están determinadas por el espesor de las paredes celulares y también por el ángulo de orientación de las microfibrillas (Richardson, 1978). A nivel de ultraestructura, la pared celular está conformada por diversas capas, las cuales difieren entre sí tanto por su tipo de orientación, así como por su composición química (Haygreen y Bowyer, 1994). La pared primaria está asociada con las células meristemáticas y crecimiento en área. Esta pared está estrechamente ligada a la lámina media, y en la práctica al complejo formado por el material intercelular y las dos paredes primarias de ambos lados se le conoce con el nombre de lámina media compuesta (Panshin y de Zeeuw, 1970).

El crecimiento de la pared celular, después de haberse completado la fase de crecimiento en área, se produce por la formación por aposición de material adicional en la parte interna de la pared primaria, produciendo las conocidas capas de la pared secundaria; las cuales debido a su estructura, representan la mayor fuente de resistencia de la pared xilemática (Panshin y de Zeeuw, 1970). La pared secundaria consiste de tres capas (Fig. 3), una más externa y delgada, con los ejes de las microfibrillas aproximadamente horizontales denominada capa S_1 , una capa central gruesa con las microfibrillas aproximadamente paralelas al eje celular denominada capa S_2 y una capa más interna y delgada, formada por microfibrillas que se disponen aproximadamente paralelas a la capa S_1 , denominada capa S_3 (Richardson, 1978).

Los componentes químicos de la pared celular no están distribuidos uniformemente a través de toda la pared; la mayor concentración de lignina se encuentra en la lámina media compuesta, y decrece en las capas de pared secundaria. La capa S_2 contiene de 18 a 25 %, mientras que la capa S_3 11 a 18 %. En general, más de la mitad de la lignina ocurre en la capa S_2 , donde el volumen de la pared es mayor; a pesar de la alta concentración de lignina

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

en la lámina media compuesta, el volumen de esta capa de pared es tan pequeño que sólo contiene cerca del 10 % del total de la lignina (Panshin y de Zeeuw, 1970). En relación con la celulosa generalmente menos del 10 % de la pared primaria es celulósico; en la capa S_2 la celulosa aumenta hasta más del 50 %, mientras, se evidencia en la capa S_3 una reducción en la cantidad de celulosa. El contenido de lignina está relacionado inversamente al contenido de polisacáridos totales (celulosa y hemicelulosa), los cuales tienden a variar más o menos directamente (Panshin y de Zeeuw, 1970).

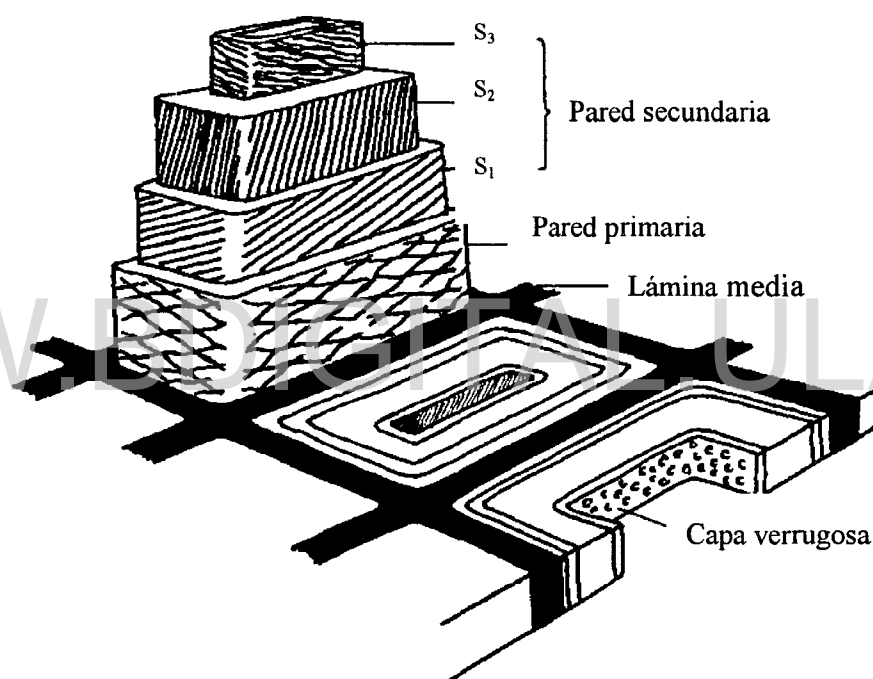


Fig. 3. Estructura general de la pared celular (reproducido de Eaton y Hale, 1993).

3.2. Degradación de la madera por microorganismos

La pudrición es una de las mayores causas del deterioro biológico de la madera, la cual es causada por ciertas clases de hongos que utilizan la madera y sus componentes como fuente de alimento (Cassens et al., 1995). Existen numerosos tipos de hongos diferentes, los cuales infestan y degradan la madera bajo diferentes condiciones ambientales, produciendo

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

cambios visibles en la madera atacada (Willeitner y Liese, 1992). Un 98 % de los hongos que habitan y degradan la madera son Basidiomycetes (Ryvarden, 1995); éstos constituyen un grupo importante de hongos tanto beneficiosos como perjudiciales para el hombre, los cuales pueden desarrollarse tanto en el suelo como en la madera; algunos son parásitos y causan pudrición de duramen y raíces, sin embargo, la mayoría son saprobios y su papel más importante es descomponer madera y restos de plantas herbáceas (Alexopoulos y Mims, 1979). Los miembros de la subdivisión Basidiomycotina comúnmente referidos como Basidiomycetes, son aquellos hongos en la cual sus procesos sexuales involucran la producción de basidiosporas haploides originadas sobre basidias en la cual un núcleo diploide sufre meiosis (Carlile y Watkinson, 1994).

Si bien las diversas especies de árboles producen maderas química y estructuralmente diferentes, todas son susceptibles a la biodegradación; una vez que los hongos entran a la madera, estos se desarrollan de célula a célula a través de las platinas de perforación existente entre los elementos vasculares y/o las punteaduras o pueden penetrar directamente a través de la pared celular por medio de la producción de agujeros de penetración (Blanchette et al., 1990). Aquellas células con mayor cantidad de alimento de reserva, como por ejemplo las del parénquima radial, son colonizadas primero (Rayner y Boddy, 1988). Otros hongos utilizan solo los nutrientes de reserva almacenados en células de la madera, pero no producen una degradación significativa de la pared celular; estos hongos principalmente causan una decoloración artificial sobre la superficie de la madera y ésta puede volverse en varias tonalidades de azul, marrón, gris o roja, dependiendo del organismo y del sustrato (Blanchette et al., 1990). Recientes investigaciones sin embargo (Encinas et al., 1998), señalan la posibilidad de que estos hongos pueden ocasionar algún grado de degradación de la pared celular y por lo tanto modificaciones en las propiedades de resistencia de la madera.

Los hongos que destruyen la madera degradando la pared celular pueden ser separados en grupos dependiendo de las características de pudrición que produzcan; blanca, marrón y blanda, son las tres categorías más utilizadas para clasificar las diferentes formas de

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

putridión. Aún cuando este sistema de clasificación no es muy preciso, considerando que existen miles de especies de hongos, se deben considerar criterios homogéneos que permitan separar las diferentes formas de putridión, basadas sobre el conjunto de diferencias macro y microscópicas (Blanchette et al., 1990). La putridión blanca es aquel tipo de putridión donde se descomponen todos los componentes de la madera, incluyendo la lignina; la madera afectada es reducida a una masa esponjosa, a bolsillos o rayas blancas de diferentes tamaños, separados por áreas de madera firme y fuerte, o por una zona fibrosa, generando un blanqueamiento de la madera (Alexopoulos y Mims, 1979). El término putridión blanca es usado comúnmente para describir la apariencia de la madera; sin embargo, existen diferencias en la micromorfología del ataque y en el efecto a niveles químicos (Blanchette et al., 1990). Una amplia descripción de la putridión blanca incluye el término putridión simultánea (Eaton y Hale, 1993). Los hongos de putridión blanca se distinguen de los hongos de putridión marrón por la producción de fenol-oxidasas (Eaton y Hale, 1993). Estos hongos son capaces de degradar extensivamente la lignina y pueden hacerlo mientras degradan otros componentes de la pared celular de la madera. No obstante, la putridión blanca del tipo simultánea involucra la degradación de los principales polímeros estructurales de la madera (celulosa, hemicelulosa y lignina) al mismo tiempo y en una proporción similar; mientras que otros hongos de putridión blanca del tipo selectiva degradan la lignina y hemicelulosa antes que la celulosa (Blanchette et al., 1990). Algunos hongos que producen un ataque selectivo sobre la lignina pueden remover la lámina media entre células, sin embargo, no degradan totalmente las esquinas de las mismas (Eriksson et al., 1990).

Los hongos de putridión marrón por su parte, degradan la celulosa dejando la lignina más o menos inalterada (Haygreen y Bowyer, 1994). Estos hongos depolimerizan y metabolizan los carbohidratos estructurales de la pared celular, reduciendo radicalmente el grado de polimerización e incrementando la solubilidad en álcali; estos cambios están asociados con las drásticas reducciones en las propiedades de resistencia de la madera, aún en estados incipientes de putridión (Zabel y Morrell, 1992). La madera es reducida a masas de restos de madera, variando en varias tonalidades de marrón. En los últimos estados de putridión y

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

cuando está seca, la madera muestra profundas grietas transversales y longitudinales debido a una contracción causada por la pérdida de los carbohidratos de la pared celular presentando un aspecto de cubos (JUNAC, 1988); el tamaño y profundidad de las grietas varía de acuerdo al tipo de hongo y la especie de madera. Los hongos de pudrición marrón producen celulasas (endo y exocelulasas), hemicelulasas, β - glucosidasas y oxidasas (Eriksson et al., 1990). Se ha demostrado mediante la difracción de rayos x que las regiones amorfas de la celulosa son atacadas por enzimas celulóticas del hongo más fácilmente que las regiones cristalinas (Eaton y Hale, 1993). El grado de polimerización de la celulosa puede afectar la proporción en la cual las moléculas de celulosas son solubilizadas; sin embargo, se acepta que el modo inicial de ataque es al azar, a lo largo de la longitud de la cadena de celulosa accesibles por las endocelulasas. En contraste, las exocelulasas toman como sitio de ataque radicales terminales o extremos de las moléculas de celulosa (Zabel y Morrell, 1992).

La pudrición blanda ocurre principalmente bajo condiciones donde el desarrollo y actividad de los Basidiomycetes es retardada por un alto contenido de humedad, baja aireación o por el efecto de preservantes o extractivos (Eaton y Hale, 1993). Entre otros factores influyentes, las temperaturas elevadas y las altas concentraciones de nitrógeno soluble pueden favorecer la pudrición blanda (Blanchette et al., 1990). Esta pudrición es causada por Ascomycetes y Deuteromycetes, aún cuyo algunos autores han reportado cavidades en la pared celular producidas por Basidiomycetes, los cuales son normalmente reconocidos como hongos de pudrición blanca y marrón (Zabel y Morell, 1992). En este tipo de pudrición, la principal característica es la producción de cavidades en la capa S₂ de la pared celular, las cuales pueden variar morfológicamente dependiendo del tipo hongo y del tipo de sustrato (Eriksson et al., 1990).

Para mejor ilustración de los reconocidos tipos de degradación de la madera por algunos hongos de pudrición, Zabel y Morrell (1992) sugieren la siguiente clasificación:

Pudrición blanca simultánea: en la cual todos los constituyentes de la pared celular son atacados en forma uniforme durante todos los estados de la pudrición. Algunos hongos: *Trametes versicolor*, *Irpex lacteus*.

Pudrición blanca secuencial: en la cual todos los constituyentes de la pared celular son atacados; sin embargo, el ataque inicial es selectivo hacia la hemicelulosa y la lignina. Pueden ocurrir otras secuencias de ataque a otros constituyentes de la pared celular. Algunos hongos: *Phellinus pini*, *Heterobasidium annosum*.

Pudrición marrón: en la cual son atacados primariamente los carbohidratos de la pared celular, dejando la lignina modificada al final del proceso de pudrición. Algunos hongos: *Gloeophyllum sepiarium*, *Serpula lacrimans*.

Pudrición blanda: en la cual se evidencia una preferencia de los hongos hacia los carbohidratos presentes en la capa S₂ de la pared secundaria, formando cavidades longitudinales o erosionando la pared celular de la madera desde la superficie del lumen en latifoliadas o la S₂ en coníferas. Algunos hongos: *Chaetomium globosum*, *Alternaria alternata*.

3.3. Durabilidad natural de la madera

El término durabilidad es comúnmente usado en el comercio de maderas para designar la resistencia a la pudrición. Actualmente, la durabilidad de la madera es un término más amplio y refleja la resistencia de la madera a otros factores de deterioro, tales como insectos, perforadores marinos y agentes atmosféricos, así como los hongos de pudrición (Zabel y Morrell, 1992). La vida útil de una madera está determinada, por una parte, por aspectos inherentes a su naturaleza y, por otra, por las condiciones generales de

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

servicio (JUNAC, 1988). Con relación a los aspectos inherentes a su naturaleza, se puede afirmar que la madera de duramen es generalmente mucho más durable que la albura, fenómeno que se atribuye a los cambios químicos que se producen durante la transformación de albura a duramen. Muchos de los extractivos que se depositan en el duramen y que imparten resistencia a determinadas maderas, son compuestos cíclicos aromáticos y fenólicos, los cuales pueden variar tanto en sus concentraciones efectivas, así como en su actividad sobre diferentes tipos de hongos de pudrición (Eaton y Hale, 1993). Asimismo, aquellas maderas densas y de color oscuro son usualmente más durables; las maderas con altas densidades son menos porosas y por lo tanto cuentan con menos disponibilidad de acceso de agua y oxígeno; las coloraciones oscuras corresponden a sustancias que reducen la absorción de agua o a extractivos que pueden ser tóxicos para los hongos de pudrición (JUNAC, 1988).

3.3.1. Métodos para medir la durabilidad de la madera

La durabilidad de la madera puede ser determinada a través de métodos de laboratorio y de campo (cementerio de estacas). Las pruebas de laboratorio a diferencia de las de campo, han sido desarrolladas para medir la resistencia de la madera en un tiempo relativamente corto (usualmente cuatro meses), y están basadas sobre las pérdidas de peso resultantes de la degradación micótica. Es importante siempre en estas pruebas utilizar hongos de pudrición marrón y hongos de pudrición blanca (Findlay, 1985). Entre las técnicas aplicadas en laboratorio, se encuentra la utilizada por la escuela norteamericana y que consiste en el cultivo de un hongo patrón de comprobada actividad xilófaga, en extracto de malta-agar, en cápsulas de Petri o frascos Erlenmeyer (AWPA, 1992). En Estados Unidos de Norteamérica donde se ha originado este método (soil/block), se ha generalizado el estudio de la durabilidad en probetas de madera colocadas sobre tierra preparada para el desarrollo de los hongos.

El soil/block es un método muy eficaz y proporciona resultados satisfactorios en un tiempo relativamente corto, permitiendo además, estudiar el comportamiento tóxico de varios

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

preservantes, obteniéndose comparaciones entre los mismos ya que las probetas de madera son impregnadas a diferentes concentraciones. De este modo, es también posible determinar los puntos fungistáticos y fungicidas para los hongos de prueba, es decir, la dosis límite para lograr la paralización en el crecimiento de los hongos y su envenenamiento total (JUNAC, 1988). Esto es muy importante para determinar la cantidad justa de un preservante y no incurrir en excesos que resulten antieconómicos.

3.3.2. Pérdida de peso

Los microorganismos que habitan la madera se desarrollan dentro de ésta, utilizando alguno o todos los componentes de la pared celular, ocasionando consecuentemente una disminución en el peso de la madera (Rayner y Boddy, 1988). Algunos hongos utilizan primariamente los nutrientes accesibles en los tejidos de almacenamiento, causando relativamente una menor pérdida de peso (1 a 3 %) produciendo un daño mínimo, otros atacan enzimáticamente la mayor cantidad de los componentes de la pared celular, metabolizando eventualmente éstos en dióxido de carbono y agua. La pérdida de peso en la madera puede estar cerca del 70 % cuando es producida por hongos de pudrición marrón, 96 a 97 % para hongos de pudrición blanca y de 3 a 60 % para hongos de pudrición blanda (Zabel y Morrell, 1992).

Para efectos de comparación en cuanto a la magnitud de deterioro que ocasionan los agentes de biodeterioro, la cual depende del tipo de hongo y las especies de madera, se utiliza comúnmente la pérdida de peso (biomasa) y generalmente es expresada mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Pérdida de Peso \%} = \frac{(\text{Peso original} - \text{Pérdida de peso por la pudrición})}{\text{Peso original}} \times 100.$$

La pérdida de peso generalmente se expresa con relación al peso seco en estufa, desafortunadamente, el secado de la madera a temperaturas de 100 °C puede degradar la pared celular de la madera (Zabel y Morrell, 1992) lo cual puede alterar la susceptibilidad al

Licencia Creative Commons:

ataque microbial, por lo que es conveniente algunas veces utilizar temperaturas menores que no afecten la composición de la pared celular, aunque tarde más en secar completamente la madera. La determinación de la pérdida de peso ha sido una herramienta ampliamente utilizada como técnica para la determinación de la durabilidad relativa de no solamente especies maderables, sino también en otros productos de madera. Reis (1972) utilizó la técnica del soil/block para estudiar la resistencia a la pudrición por hongos de tableros fabricados con varias maderas provenientes de la cuenca Amazónica del Brasil. De igual manera, Okoro et al. (1984) estudiaron la influencia de diferentes concentraciones de sales ACA (amoniacal, cupro, arsenicales) sobre la durabilidad natural de tableros de partículas obtenidos a partir de maderas latifoliadas africanas. Hong y Yamamoto (1989) realizaron una modificación de la norma ASTM D 2017, la cual es utilizada para la determinación de la durabilidad natural de maderas, evaluando además de la pérdida de peso otras propiedades importantes en la madera tales como: densidad, absorción de agua, extractivos, pH, contenido de lignina, así como la proporción de elementos vasculares y fibras. Estos nuevos parámetros fueron utilizados para establecer posteriormente una ecuación de regresión para la estimación de la durabilidad. Clark y Sheffer (1983) aplicaron la técnica del soil/block para determinar la durabilidad natural del duramen de *Sequoia sempervirens* (D. Don) Endl. y establecieron comparaciones para árboles de diferentes edades.

En Venezuela, específicamente en el Laboratorio Nacional de Productos Forestales (LNPF) han sido realizadas varias investigaciones con la finalidad de determinar basándose en la pérdida de peso la durabilidad natural de un gran número de maderas venezolanas en pruebas de campo y de laboratorio. Silverborg et al. (1970) estudiaron el efecto de varios hongos de pudrición blanca y marrón sobre la durabilidad relativa de 40 especies de maderas venezolanas, de las cuales 33 eran provenientes de la Guayana Venezolana y 7 de los Llanos Occidentales (Edo. Barinas). Mayorca (1972) estudió mediante ensayos de campo la durabilidad natural de 115 especies maderables de la Guayana Venezolana. El mismo año Mayorca, (1972) determinó la durabilidad relativa de 32 maderas de los Altos Llanos Occidentales de Venezuela. En 1976, se realizaron ensayos

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

de campo para determinar la durabilidad de 17 maderas venezolanas con la finalidad de estudiar su factibilidad para la elaboración de cajas para embalar frutas y hortalizas (Mayorca, 1976). La clasificación de estas maderas fue hecha basándose en la resistencia a hongos y comejenes durante un periodo de 8 años en campo, mientras que la durabilidad relativa fue evaluada en laboratorio utilizando las técnicas del soil/block y agar/block.

También se determinaron las resistencias a las pudriciones blanca y marrón de la palma manaca *Euterpe oleraceae* Mart. (Bracamonte y Holmquist 1995) mediante pruebas de laboratorio (agar/block). En este estudio se evaluó la durabilidad natural así como la adquirida conseguida con el uso de sales de cobre y boro aplicadas mediante tratamiento por doble difusión. Ceballos 1995, realizó un estudio detallado sobre la durabilidad relativa del cascarillo (*Ocotea cymbarum* H.B.K), el ensayo consistió al igual que los anteriores únicamente en la determinación de la pérdida de peso sin lograr profundizar en las propiedades intrínsecas de durabilidad de esta especie como consecuencia de su alto contenido de sustancias extractivas.

3.3.3. Patrones de degradación de la madera por los hongos

El estudio de la degradación de la madera por efecto de ataque de hongos ha precisado desarrollar técnicas que permitan por una parte identificar el organismo que está presente en el material, y por la otra determinar su distribución espacial y su actividad (Rayner y Boddy, 1988). Los patrones de crecimiento de los hongos en las maderas en descomposición han sido estudiados utilizando microscopio de luz y/o por medio de la microscopía electrónica. Dentro de las características importantes observables mediante microscopio de luz se encuentran erosiones de la pared celular, presencia de agujeros de penetración, hifas con fibulas, destrucción de tejidos parenquimáticos, entre otros, mientras que con el uso del microscopio electrónico se pueden conseguir detalles de los procesos de biodegradación a niveles de ultraestructura de la madera; varios investigadores han demostrado la importancia de la determinación de las características de degradación de las paredes celulares en la madera por los microorganismos en el campo de estudio de la

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

microbiología de maderas (Wilcox, 1970; Eriksson et al., 1980; Blanchette et al., 1980; Nilsson y Daniel, 1989; Eriksson et al., 1990; Encinas y Daniel, 1995; Encinas et al., 1996; Singh y Kim, 1997; Encinas et al., 1998).

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Materiales

Se estudiaron tres maderas, una conífera y dos latifoliadas. La madera de conífera fue *Pinus caribaea* (Mor.) var. *hondurensis* Barr. y Golf. (pino caribe) de 30 años de edad, proveniente de las plantaciones de la Estación Experimental El Irel en Barrancas, estado Barinas. Las maderas latifoliadas fueron *Pterocarpus acapulensis* Rose (drago), y *Tabebuia serratifolia* (Vahl.) Nicholson (curarire), provenientes de los bosques naturales de los llanos occidentales de Venezuela y bosque xerofítico del Estado Falcón respectivamente.

Se utilizaron dos hongos de pudrición blanca *Trametes versicolor* (L.: Fr.) Pilát (FP-133255-R) y *Pycnoporus sanguineus* (L.: Fr.) Murr. (4045 Laboratorio de Patología Forestal de la Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales), así como un hongo de pudrición marrón *Gloeophyllum trabeum* (Fr.) Murr. (Mad-617-R).

El preservante utilizado para lograr durabilidad inducida en las maderas fue el preservante hidrosoluble CCA (cupro-cromo-arsenicales) Wolman® 72% con la composición siguiente:

Ingrediente activo:

Ácido crómico (CrO_3) 34,20%

Óxido cúprico (CuO) 13,32%

Pentóxido de arsénico (As_2O_5) 24,48%

Ingrediente inactivo:

Agua 28,00%

Total 100,00%

Las concentraciones ensayadas 5, 10 y 15% de sal, se prepararon utilizando agua corriente como diluyente.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Para el método del soil/block, el suelo usado fue suelo forestal de las cercanías del Laboratorio Nacional de Productos Forestales (LNPF) con textura franco, pH 5,67 a 55% de contenido de humedad.

4.2. Métodos

El estudio de la durabilidad de las maderas de pino caribe, drago y curarire, tanto en forma natural como inducida con sales CCA, frente al ataque de los tres hongos ensayados se efectuó midiendo la pérdida de peso a lo largo de cuatro meses, y estudiando cada mes cuales fueron los cambios en la pared celular de las maderas analizadas utilizando un microscopio de luz. Para la determinación de la pérdida de peso se siguió la metodología para Basidiomycetes según la Norma ASTM (D-1413) E10-91 soil/block (AWPA, 1992).

Las probetas para durabilidad inducida fueron preservadas con CCA a 5, 10 y 15 % de concentración, y dejadas por espacio de dos semanas para permitir la fijación del preservante dentro de la madera. Las retenciones del preservante fueron determinadas por diferencia de peso de las muestras antes e inmediatamente después del tratamiento.

Se utilizaron 240 probetas de madera de 1,9 x 1,9 x 1,9 cm por especie para un total de 720. El total de probetas por especie fue distribuido de la siguiente manera:

- 16 probetas sin tratamiento químico para la determinación de la durabilidad natural para cada uno los hongos de prueba, para un total de 48 probetas.
- 16 probetas para cada concentración de preservante para la determinación de la durabilidad inducida, e inoculadas con las cepas de los hongos de prueba, para un total de 144 probetas.
- 12 probetas sin tratamiento químico y 12 probetas para cada concentración de CCA, no inoculadas sirvieron como testigos, para un total de 48 probetas.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Así, cada tratamiento (4 probetas por período de incubación) fue distribuido en dos frascos, colocando dos probetas en cada uno de éstos, de las cuales tres sirvieron para evaluar la pérdida de peso y contenido de humedad y una para observaciones microscópicas, igualmente, se prepararon los frascos que contenían las muestras testigos, con dos probetas para pérdida de peso y contenido de humedad y una para observaciones microscópicas.

Las cepas de los hongos de prueba fueron replicadas en cápsulas de Petri, utilizando malta-agar al 2,5 % como medio de cultivo. En cada frasco de 200 ml de capacidad, se colocaron 90 gr de suelo seco al aire y se agregaron 15 ml de agua destilada requerida para llevar el suelo a 55 % de contenido de humedad. Siguiendo la metodología, en contacto con el suelo se colocaron bloques de alimentación de pino caribe de 0,4 x 1,9 x 3,5 cm. Los frascos fueron tapados y esterilizados por 20 minutos en autoclave a una temperatura de 120 °C y 1 atm de presión.

Luego de la esterilización de los frascos de cultivo conteniendo el suelo y los bloques de alimentación, se cortó un inóculo del hongo en malta agar de aproximadamente 1 cm², de no más de 3 semanas de cultivo en las cápsulas de Petri y se procedió a colocarlo estérilmente en el borde de cada bloque de alimentación. Los frascos inoculados con su respectiva identificación fueron tapados e incubados por tres semanas, hasta que los bloques de alimentación fueron colonizados por el micelio de los hongos.

En el intervalo, las probetas de las maderas ensayadas fueron secadas en estufa a 60 °C para no alterar la composición ni estructura de los componentes de la pared celular, hasta obtener peso constante. Estérilmente se colocaron 2 probetas sobre el bloque de alimentación en cada frasco, los cuales fueron tapados, cubiertos con papel parafilm e incubados a 27 °C y 75 % de humedad relativa por un período de cuatro meses (Figs.4 y 5).

Al finalizar cada período de incubación, las muestras de madera fueron extraídas de los frascos, se removió cuidadosamente el micelio y se procedió a pesarlas utilizando una balanza de 0,1 mg de precisión. Las probetas se secaron en estufa a 105 ± 2 °C por 24 horas

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

y se pesaron nuevamente para determinar la pérdida de peso, con relación al peso seco inicial. Para cada tiempo de incubación, se calculó adicionalmente el contenido de humedad de las muestras.

Para la determinación de las características de ataque sobre la pared celular por los hongos, se realizaron cortes finos en las probetas de madera tanto en sección longitudinal como transversal y fueron teñidos con safranina al 0,1 % en glicerol y/o azul de anilina en 50 % en ácido láctico. Las observaciones fueron realizadas utilizando un microscopio óptico Kyowa Mediluz-12, bajo luz normal. La depolimerización de la celulosa en la pared celular se apreció por la pérdida de la birefringencia de los cortes a la luz polarizada.

Los resultados obtenidos para pérdida de peso y contenido de humedad, fueron analizados estadísticamente mediante ANAVA y análisis de regresión, por medio de la aplicación de un modelo estadístico diseño factorial $4 \times 4 \times 3 \times 3$, utilizando para el análisis el paquete estadístico Minitab bajo Windows versión 10.2.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

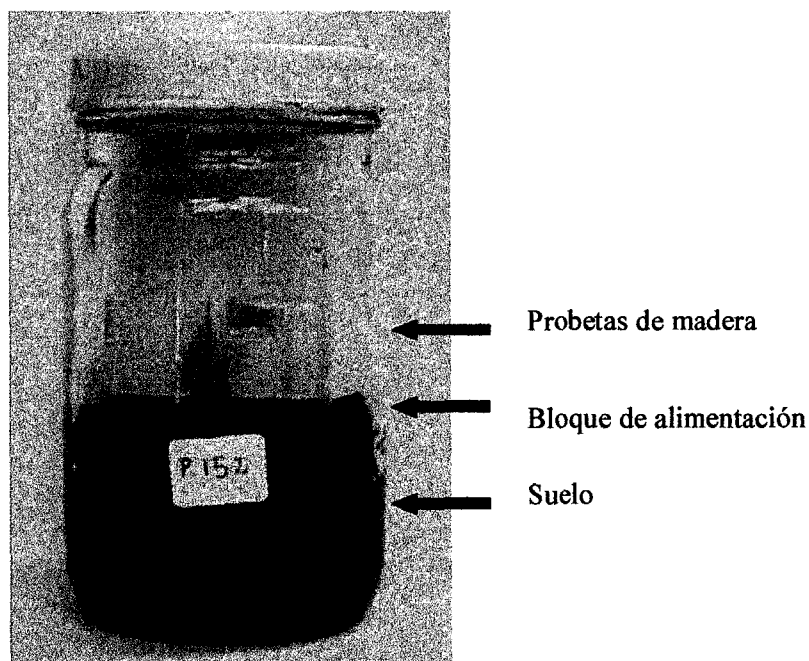


Fig. 4. Detalle de los frascos conteniendo el suelo, bloque de alimentación y probetas de madera.



Fig. 5. Disposición de los frascos conteniendo el ensayo en el cuarto de acondicionamiento durante el período de incubación.

V. RESULTADOS

5.1. Crecimiento miceliar en las cápsulas de Petri

Las tres cepas de los tres hongos utilizados mostraron variación en su crecimiento cuando fueron replicados en cápsulas de Petri conteniendo malta-agar al 2,5 % como medio de cultivo, se describe el desarrollo del micelio y sus características según Rayner y Boddy (1988).

Gloeophyllum trabeum presentó un crecimiento moderadamente rápido, cubriendo totalmente las cápsulas de Petri a los 23 días de inoculación. Micelio ligeramente levantado sobre la superficie del agar, inicialmente de color blanco, tornándose posteriormente a un color crema claro. Textura algodonosa.

Trametes versicolor mostró un crecimiento rápido, cubriendo totalmente las cápsulas de Petri a los 19 días de inoculación. Micelio inicialmente hialino, sumergido sobre la superficie del agar, tomó posteriormente un color blanquecino. Textura algodonosa.

Pycnoporus sanguineus exhibió un crecimiento rápido, cubriendo totalmente las cápsulas a los 20 días de inoculación. Micelio inicialmente blanco, adquiriendo un color naranja o rojo con partes blancas después de la primera semana. Textura lanosa tornándose a harinosa hacia el centro de la cápsula (parte más vieja del micelio).

El desarrollo del micelio durante el período de crecimiento en cápsulas de Petri para los tres hongos, correspondió a lo descrito y conocido para estas especies según Nobles (1965).

5.2. Colonización de los bloques de madera por los hongos

G. trabeum cubrió la placa de alimentación después de 11 días de inoculación, colonizando el suelo al mismo tiempo y llegando inclusive hasta el fondo de los frascos mediante el

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

desarrollo de rizomorfos. El micelio de textura algodonosa, inicialmente de color crema claro, fue tornándose más intenso hasta alcanzar un color amarillo. Una vez colocadas las probetas de madera sobre los bloques de alimentación, se produjo una rápida colonización de la madera de pino caribe cubriéndola total y uniformemente con una fina capa de micelio después de 8 días, esta colonización no fue la misma en las maderas de las latifoliadas, donde solamente se desarrolló sobre la base.

Después del primer mes de incubación, el micelio se presentó de manera muy abundante y uniforme sobre las maderas de pino caribe y drago; en curarire el micelio fue más escaso y no cubrió uniformemente las probetas. Esta característica de crecimiento de *G. trabeum* sobre las tres maderas se mantuvo durante todo el período de incubación; sin embargo, después del último mes las probetas de pino caribe presentaron una mayor cantidad de micelio en la parte superior y el hongo desarrolló fructificaciones sobre la placa de alimentación, base de las probetas y superficie del suelo, mientras que en la madera de curarire, la cantidad de micelio sobre las probetas fue mucho menor que la producida durante el primer mes de incubación (Fig. 6).

G. trabeum no colonizó las muestras de madera tratadas con diferentes concentraciones de sales CCA en ninguna de las especies de madera, y al final del primer mes de incubación desarrolló fructificaciones abundantes en la placa de alimentación, base de las probetas y superficie del suelo.

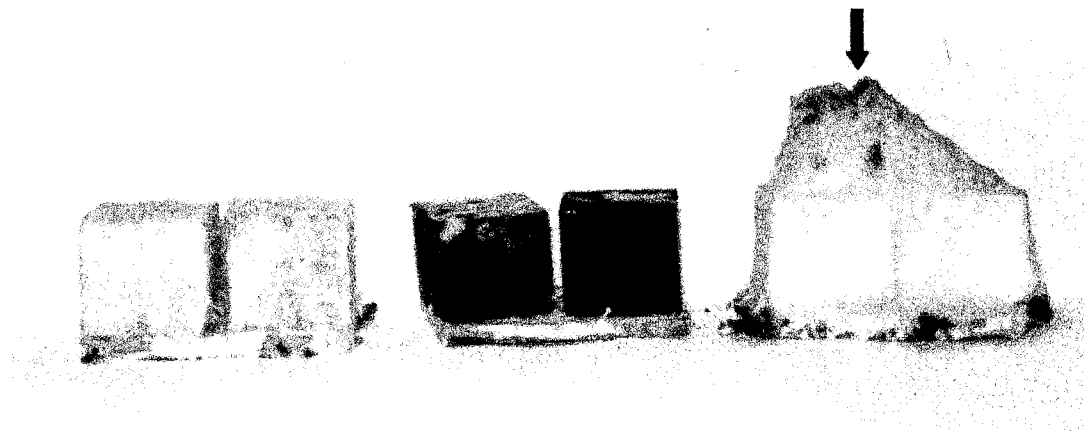


Fig. 6. Desarrollo del micelio de *G. trabeum* sobre las maderas no tratadas de drago, curarire y pino caribe después del último mes de incubación. La flecha señala el crecimiento abundante del micelio sobre la parte superior de las probetas de pino caribe.

T. versicolor colonizó lentamente los bloques de alimentación y suelo, desarrollando un micelio de color blanco, escaso, de textura algodonosa después de los 15 días de incubación. Sin embargo, al colocar las probetas de drago sobre los bloques de alimentación, el hongo comenzó a desarrollarse vigorosamente cubriendo los bloques a los 4 días, en las probetas de pino caribe y curarire el crecimiento fue más lento.

Al finalizar el primer mes de incubación, las probetas de drago fueron cubiertas por abundante micelio; en pino caribe solo se presentó en ciertas partes de las probetas, mientras que en curarire no se observó crecimiento miceliar. Esta característica se mantuvo hasta el final del último período de incubación sin presentar variaciones significativas (Fig.7).

T. versicolor no colonizó las maderas tratadas con diferentes concentraciones de sales CCA, no llegando a desarrollarse ni siquiera sobre la base de las probetas.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

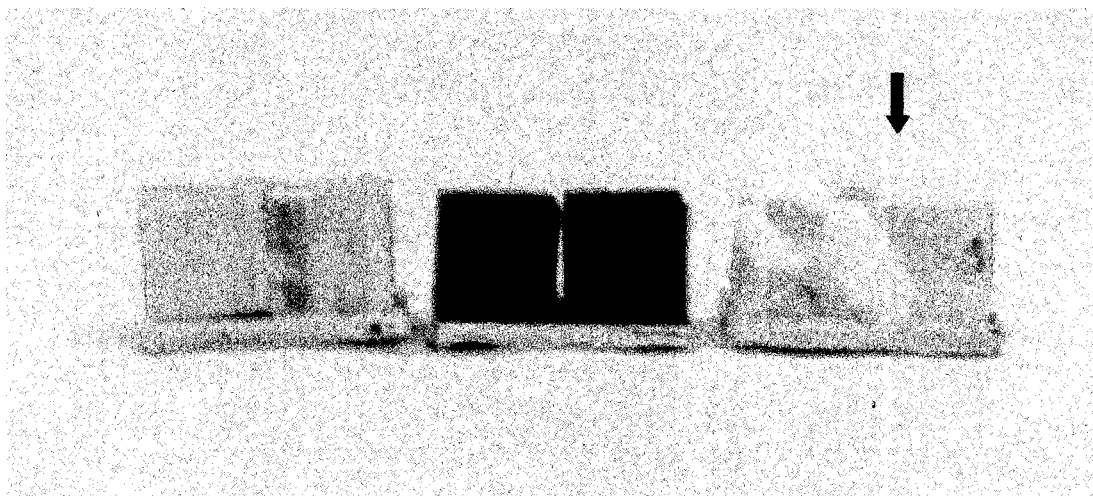


Fig. 7. Desarrollo del micelio de *T. versicolor* sobre las maderas no tratadas de pino caribe, curarire y drago, después del último período de incubación. La flecha señala el crecimiento abundante del micelio sobre las probetas de drago.

P. sanguineus colonizó rápidamente los bloques de alimentación a los 13 días de inoculación, cubriéndolos totalmente con un micelio abundante de textura lanosa el cual invadió todo el suelo llegando hasta el fondo de los frascos. Al colocar las probetas sobre los bloques de alimentación, el micelio comenzó a desarrollarse rápida y vigorosamente, y al finalizar el primer mes de incubación, había colonizado uniformemente las maderas de pino caribe y drago. En las probetas de curarire, aún cuyo su crecimiento fue abundante, éste no fue uniforme, presentándose solo por algunas zonas sobre las probetas.

Después del segundo mes de incubación, el crecimiento de *P. sanguineus* fue más acelerado, desarrollándose sobre las paredes de los frascos y presentando manchas rojas en el micelio. Al finalizar el tercer período de incubación, las latifoliadas fueron cubiertas totalmente quedando dentro de una masa esponjosa de micelio de color naranja, mientras que la conífera fue solo cubierta con una fina capa de micelio color rojo. Estas características morfológicas se mantuvieron hasta el final del período de incubación.

P. sanguineus no colonizó las maderas tratadas con las diferentes concentraciones de sales CCA, logrando crecer escasamente sobre la base de las probetas en las tres maderas.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

5.3. Pérdida de peso

5.3.1. Observaciones sobre pino caribe

Después de 30 días de incubación, *G. trabeum*, *T. versicolor* y *P. sanguineus* causaron un bajo porcentaje de pérdida de peso en las muestras no tratadas con sales CCA (menos del 4 %). Después del segundo período de incubación las muestras inoculadas con *G. trabeum* experimentaron un rápido incremento en la pérdida de peso después del segundo período de incubación (12,00 %), mientras que las inoculadas con *T. versicolor* y *P. sanguineus* no produjeron variación significativa para el mismo tiempo de incubación. *G. trabeum* causó el mayor porcentaje de pérdida de peso (50,84 %), el cual fue obtenido al finalizar el último período de incubación (Fig.8).

G. trabeum, *T. versicolor* y *P. sanguineus* no causaron pérdida de peso en las maderas tratadas con diferentes concentraciones de sales CCA durante los cuatro meses de incubación, presentando valores inferiores al 1 %.

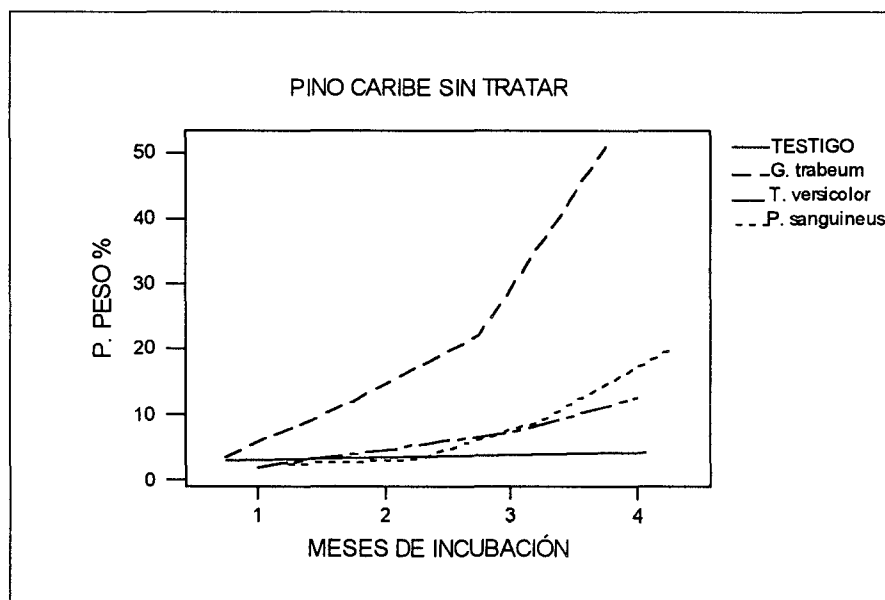


Fig. 8. Porcentajes de pérdida de peso producidos por *G. trabeum*, *T. versicolor* y *P. sanguineus* en la madera de pino caribe no tratada durante los cuatro meses de incubación.

Licencia Creative Commons:

5.3.2. Observaciones sobre drago

Las muestras no preservadas e inoculadas tanto con *T. versicolor* como con *P. sanguineus* presentaron altos valores de porcentajes de pérdida de peso después del primer mes de incubación (9,66 y 8,29 %), los cuales fueron incrementándose hasta alcanzar los mayores valores al final del período de incubación (53,32 y 38,28 % respectivamente), *G. trabeum* por otra parte, causó un porcentaje de pérdida de peso más bajo para el primer mes de incubación (2,81 %), sin embargo, éste fue también incrementándose a medida que transcurrió el tiempo, logrando de la misma manera los más altos valores al final del período de incubación (Fig. 9).

G. trabeum, *T. versicolor* y *P. sanguineus* no causaron pérdida de peso significativa en las maderas preservadas con sales CCA en ningún período de incubación (menos del 1 %).

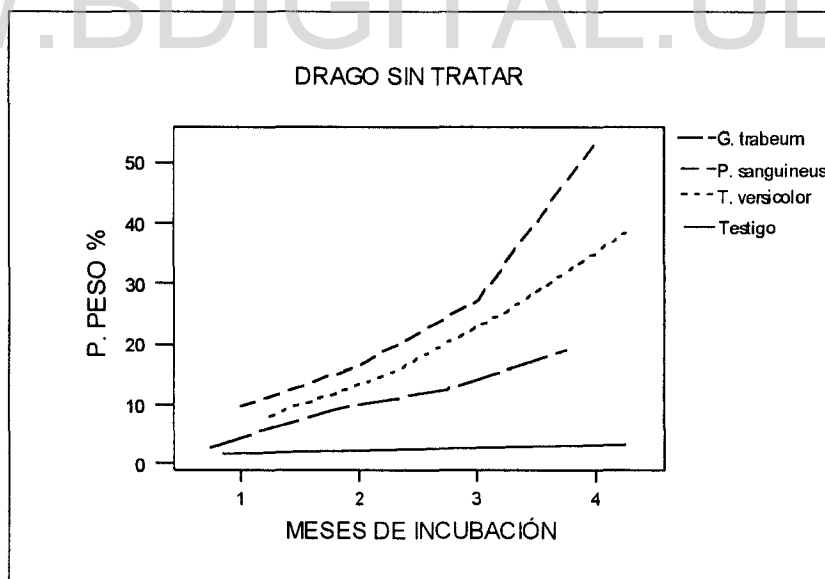


Fig. 9. Porcentajes de pérdida de peso producidos por *G. trabeum*, *T. versicolor* y *P. sanguineus* en la madera de drago no tratada durante los cuatro meses de incubación.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

5.3.3. Observaciones sobre curarire

G. trabeum, *T. versicolor* y *P. sanguineus* causaron una pérdida de peso muy baja en las muestras no tratadas, y en ninguno de los casos superó el 2 % al final del período de incubación Sin embargo, dentro de este escaso incremento se observó un aumento acelerado después del segundo mes de incubación en las muestras inoculadas con *T. versicolor* (Fig. 10). Las muestra preservadas con sales CCA tampoco experimentaron pérdidas de pesos considerables significativa durante todo el período de incubación (menos del 1 %).

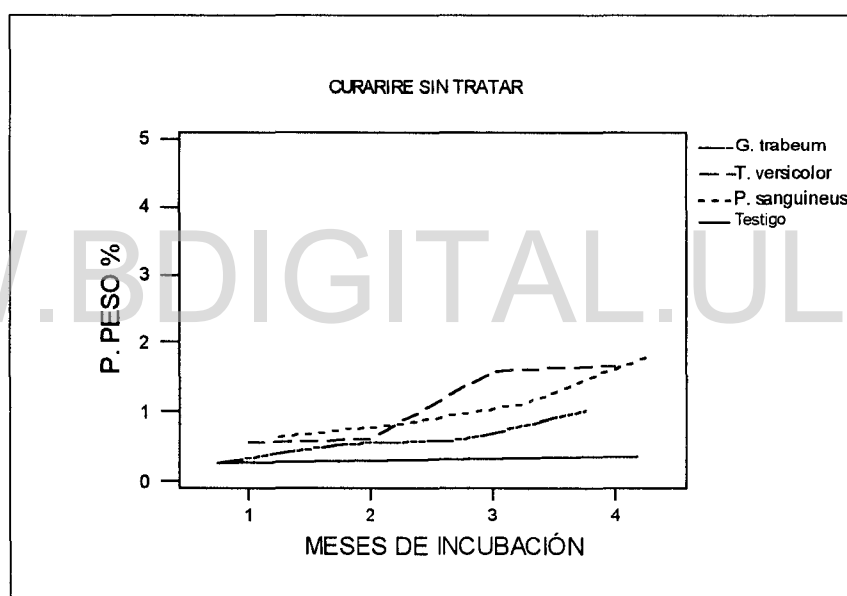


Fig. 10. Porcentajes de pérdida de peso producidos por *G. trabeum*, *T. versicolor* y *P. sanguineus* en la madera de curarire no tratada durante los cuatro meses de incubación.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

5.4. Variaciones en el contenido de humedad

Las maderas de pino caribe y drago no tratadas, mostraron variación en su contenido de humedad cuando fueron sometidas a los tres hongos de prueba, presentando una ligera disminución durante el primer mes de incubación, en relación con las muestras no inoculadas. Sin embargo, estos valores fueron aumentando progresivamente a medida que transcurrieron los cuatro meses de incubación, obteniéndose los valores más altos al final del último mes, los cuales en la mayoría de los casos superaron ampliamente a las muestras no inoculadas.

En pino caribe, los mayores incrementos fueron ocasionados por *P. sanguineus* y *T. versicolor* (55,34 % y 51,81 % respectivamente), mientras que los valores más bajos fueron observados en las muestras inoculadas con *G. trabeum* (41,44 %). En la madera de drago, los más significativos aumentos en los valores de contenido de humedad fueron producidos por *T. versicolor* (65,50 %) y *P. sanguineus* (64,20 %). *G. trabeum*, al igual que en pino caribe, produciendo los menores aumentos (48,58 %). En curarire, así como en las maderas tratadas con las diferentes concentraciones de sales CCA (aún al 5 %), no se presentaron cambios considerables en el contenido de humedad, durante todo el período de incubación para ninguno de los hongos, observándose valores más o menos similares a los de las muestras no inoculadas (Fig. 11).

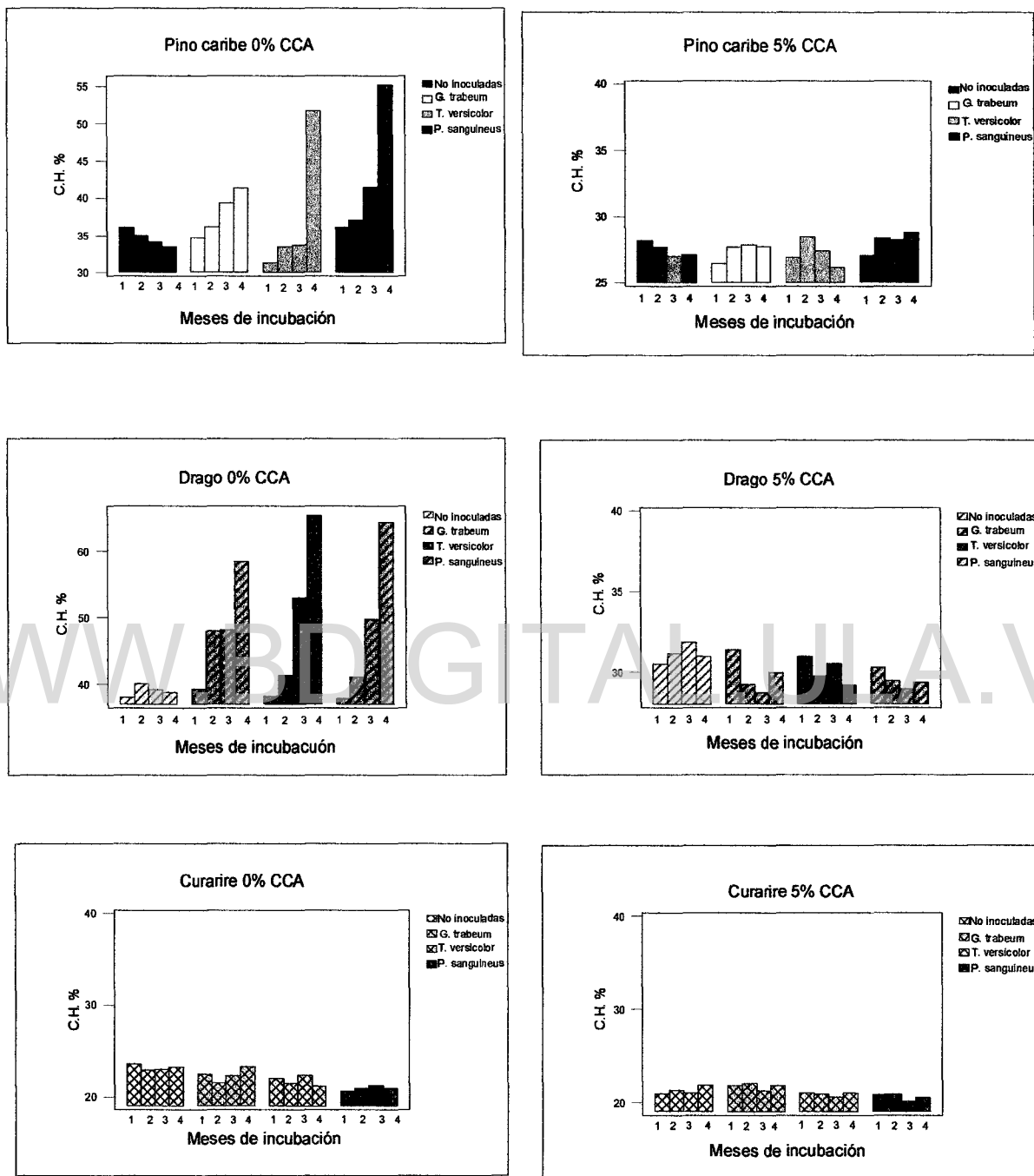


Fig. 11. Variaciones en el contenido de humedad de las maderas de pino caribe, drago y curatire sin tratamiento, así como preservadas con 5 % de sales CCA durante cuatro meses de incubación con *G. trabeum*, *T. versicolor* y *P. sanguineus*.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

5.5. Patrones de crecimiento

5.5.1. Observaciones sobre pino caribe

Durante el primer mes de incubación, *G. trabeum* colonizó la madera de pino caribe a través del parénquima radial y los canales resiníferos, pasando posteriormente a las traqueidas mediante penetración pasiva, es decir, a través de aberturas naturales de la madera: punteaduras areoladas y punteaduras del área de cruce (tipo ventana). Para este tiempo de incubación, se observaron numerosas hifas con fíbulas (clamp connections) en los lúmenes de las células de la madera temprana y tardía, las cuales generaron leve erosión de las paredes celulares del lumen (Fig. 12). El paso a otras células vecinas fue realizado mediante penetración pasiva. Para este primer período de incubación, observaciones realizadas utilizando luz polarizada revelaron una moderada pérdida de la birefringencia en la capa S₂ de la mayoría de las células, sin embargo, no todas las áreas de la madera fueron igualmente afectadas.

Las células del parénquima radial y células epiteliales de los canales resiníferos fueron atacadas fuertemente por *G. trabeum*, el cual generó una parcial degradación de estos tejidos. Durante este primer período de incubación se observó la presencia abundante de cristales, posiblemente oxalatos de calcio en corte transversal tanto en la madera temprana como en la tardía.



Fig. 12. Colonización de la madera de pino caribe no tratada por *G. trabeum* después del primer mes de incubación. Las flechas pequeñas señalan hifas con fíbulas dentro de las cavidades celulares produciendo erosión de la pared, la flecha grande señala degradación de las células del parénquima radial. Observaciones con microscopio de luz, barra: 20 μ m.

Durante el segundo período de incubación, las muestras mostraron síntomas externos visibles a simple vista de pudrición, pudiéndose inclusive rayar fácilmente con la uña. Las células de la madera tardía presentaron una mayor erosión de la pared celular con presencia de escasos agujeros de penetración longitudinales en la capa S₂ (Fig. 13). En la madera temprana, las células de las traqueidas mostraron adelgazamiento del espesor de sus paredes, permaneciendo en algunos casos solamente la lámina media. Las células de la madera temprana y tardía mostraron una mayor pérdida de birefringencia en la capa S₂ de sus paredes celulares. Las células del parénquima radial, canales resiníferos y células epiteliales fueron prácticamente degradados, las hifas del hongo comenzaron a penetrar activamente en las células vecinas mediante la producción de agujeros de penetración perpendiculares al eje de las células.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

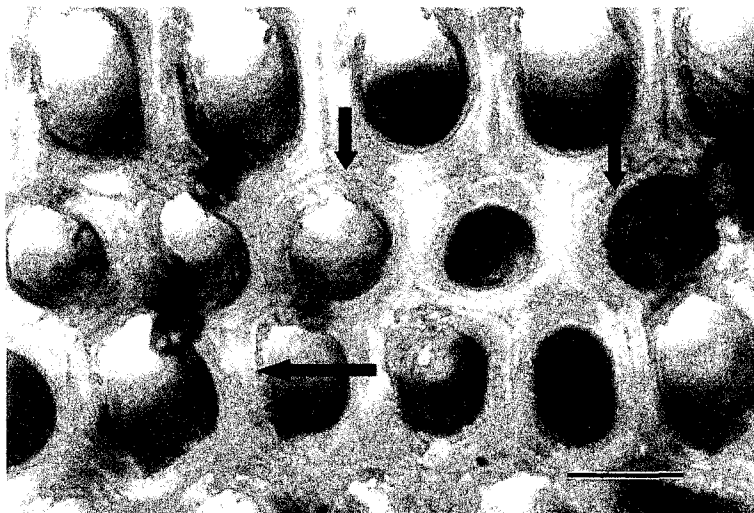


Fig. 13. Degradación de la pared celular sobre la madera de pino caribe no tratada causada por *G. trabeum*, las flechas pequeñas señalan la producción de agujeros de penetración longitudinales, la flecha grande señala erosión de la capa S₂. Observaciones con microscopio de luz, barra: 20 μ m.

Después de 90 días de incubación, *G. Trabeum* causó fuerte erosión en la mayoría de las paredes celulares de las traqueidas, desarrollando numerosas hifas adheridas a las paredes o cruzando transversalmente los lúmenes, las cuales, incrementaron la producción de agujeros de penetración longitudinales y transversales, así como, ensanchamiento y degradación de algunos bordes en punteaduras areoladas. Al finalizar el último período de incubación, prácticamente todas las células de la madera temprana y tardía fueron fuertemente erosionadas, generando el colapso de la pared celular, la cual presentó una apariencia porosa y la total pérdida de la birefringencia, la lámina media por otra parte, no presentó signos de degradación. La producción de agujeros de penetración, ensanchamiento y degradación de punteaduras areoladas fueron incrementados fuertemente durante este período.

G. trabeum no colonizó las maderas tratadas con sales CCA en ningún período de incubación y a ningún porcentaje de concentración del preservante, por muy bajo que haya sido.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

T. versicolor colonizó la madera de pino caribe vía parénquima radial y canales resiníferos, durante el primer mes de incubación. Las células de la madera temprana y tardía fueron escasamente colonizadas por las hifas del hongo, generando solamente una leve erosión de la pared celular de algunas células, generalmente en zonas adyacentes a las hifas. El crecimiento del hongo a lo largo de las cavidades celulares fue escaso, pasando a otras células vecinas solamente por penetración pasiva a través de las punteaduras areoladas y punteaduras del área de cruce. Las células del parénquima radial y células epiteliales de los canales resiníferos fueron escasamente erosionadas.

Al finalizar el segundo período de incubación, las paredes celulares continuaron siendo erosionadas, la zona de lisis además de estar localizada en la cercanía de las hifas, comenzó a observarse en casi toda la circunferencia de las paredes. Las hifas comenzaron a penetrar activamente produciendo agujeros de penetración transversales, así como la degradación de y células epiteliales de los canales resiníferos, siendo la degradación de las células del parénquima radial menos pronunciada, por lo que algunos radios permanecieron libres de ataque. La degradación de la madera de pino caribe por acción de *T. versicolor* fue más evidente después de finalizar el tercer mes de incubación, donde el hongo produjo fuerte erosión de la pared celular desde el lumen hacia la lámina media, generando una escasa pérdida de la birefringencia de la capa S₂. Hifas muy ramificadas comenzaron a colonizar fuertemente las cavidades celulares, incrementando la producción de agujeros de penetración (Fig. 14) y ensanchamiento de punteaduras areoladas.

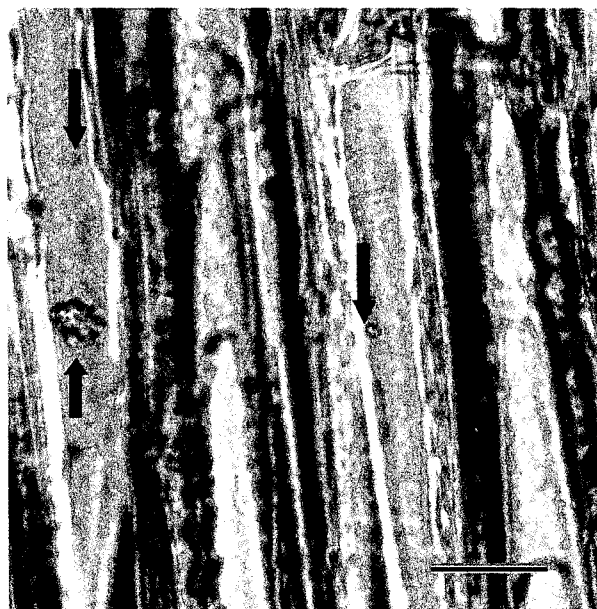


Fig. 14. Producción de agujeros de penetración en madera de pino caribe no tratada atacada por *T. versicolor* después de cuatro meses de incubación. Observaciones con microscopio óptico, barra: 20 μ m.

La degradación sin embargo, no fue uniforme en toda la madera, ya que algunas células de las traqueidas fueron completamente erosionadas, mientras que en otras la erosión fue incipiente o no hubo daño. El parénquima radial fue fuertemente erosionado, llegando a ser en la mayoría de los casos prácticamente destruido.

Al finalizar el último período de incubación, las células de la madera temprana y tardía presentaron síntomas de fuerte erosión, exhibiendo adelgazamiento de las paredes celulares, llegando inclusive en algunos casos hasta la lámina media. La pérdida de la birefringencia fue mayor en relación con la observada en el tercer mes de incubación.

T. versicolor no colonizó la madera de pino caribe preservada con sales CCA durante todo el período de incubación.

P. sanguineus colonizó la madera de pino caribe en el primer mes de incubación vía parénquima radial y canales resiníferos, invadiendo rápidamente algunas traqueidas a través de penetración pasiva y activa. Hifas muy abundantes, ramificadas y con presencia de

Licencia Creative Commons:

fibulas dentro de las cavidades celulares generaron una acelerada erosión de las paredes, originando agujeros de penetración transversales. Para este primer mes de incubación, los canales resiníferos, células epiteliales y parénquima radial fueron completamente degradados (Fig. 15).

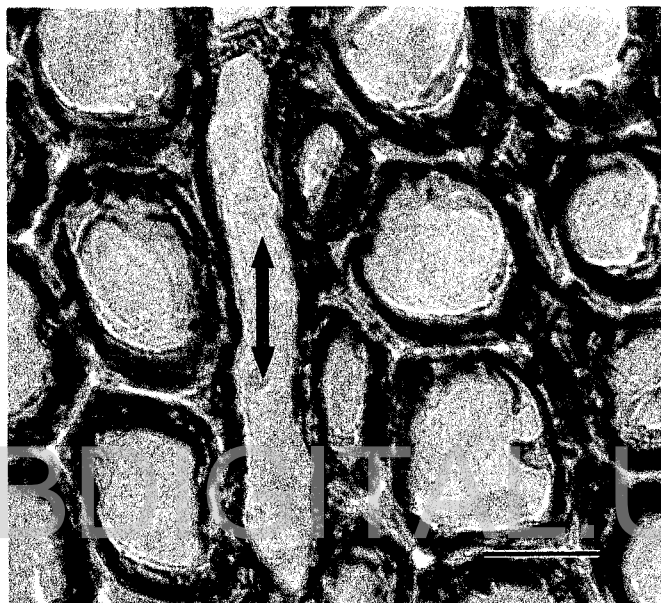


Fig. 15. Destrucción total de las células del parénquima radial en madera de pino caribe no tratada, después de un mes de incubación con *P. sanguineus*. Observaciones con microscopio óptico, barra: 20 μ m.

Después de finalizar el segundo mes de incubación, *P. sanguineus* continuó la colonización de la madera temprana y tardía, incrementando la degradación de las paredes celulares. Se observó una erosión más o menos regular de toda la superficie de las paredes de las células. Hifas muy numerosas generaron ensanchamiento de las punteaduras areoladas y erosión de algunos de sus bordes como consecuencia de la penetración pasiva, durante este período la presencia de agujeros de penetración fue mayor que las observadas en el primer mes de incubación. Para el final del tercer mes de incubación, el ataque fue observado prácticamente en toda la madera, evidenciándose una erosión gradual desde el lumen hacia la lámina media, la cual generó en la mayoría de los casos disminución del espesor de las paredes celulares (Fig. 16).

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

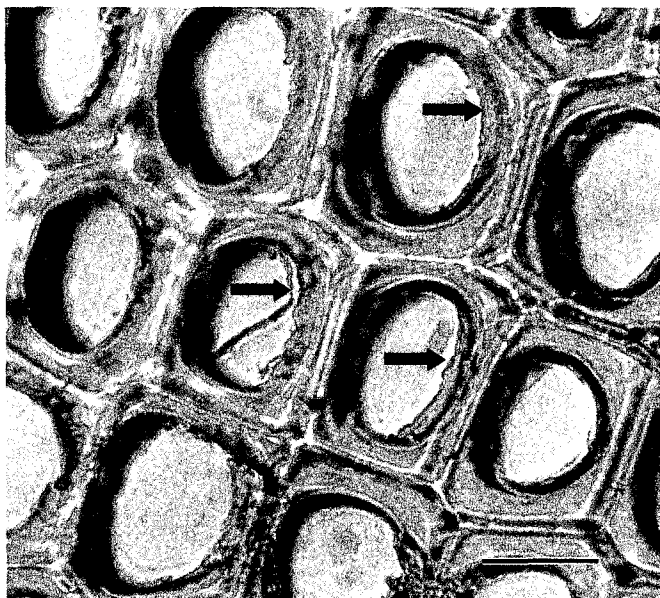


Fig. 16. Erosión gradual desde el lumen hacia la lámina media causada por *P. sanguineus* sobre madera de pino caribe no tratada después del tercer mes de incubación. Observaciones con microscopio óptico, barra: 20 μ m.

Después de finalizar el último mes de incubación, la pared celular de casi todas las células de las traqueidas fueron totalmente erosionadas, generando un mayor adelgazamiento de la pared, de tal forma que en algunos casos persistieron solamente las esquinas de las células. La lámina media fue de igual forma degradada por hongo, quedando ausente en algunas zonas de algunas células. El ensanchamiento de las punteaduras, así como la cantidad de agujeros de penetración fue mayor en este período de incubación. La birefringencia de las células, por otra parte, fue solo ligeramente alterada.

5.5.2. Observaciones sobre drago

G. trabeum colonizó inicialmente la madera de drago vía vasos, parénquima radial y axial. Después de los primeros 30 días de incubación, aún cuyo los vasos fueron colonizados vigorosamente, éstos no presentaron síntomas de erosión, no ocurriendo así en el parénquima axial y radial, donde la mayoría de sus células fueron parcialmente erosionadas. Las fibras, por otra parte, fueron escasamente colonizadas por las hifas del

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

hongo, sin embargo, éstas presentaron leve erosión de sus paredes celulares.

Durante el segundo y tercer mes de incubación, el ataque fue concentrado directamente sobre la capa S_2 de la pared celular, generando una fuerte erosión y pérdida de la birefringencia como consecuencia del ataque del hongo. El ataque sobre el parénquima radial y axial fue también intensificado durante estos períodos, sin embargo, estos no fueron destruidos completamente.

Al finalizar el cuarto mes de incubación, el ataque sobre las fibras fue mucho más evidente, observándose una clara erosión de prácticamente toda la pared celular (Fig. 17). Hifas abundantes y ramificadas, con penetración pasiva y activa degradaron fuertemente las paredes celulares de la mayoría de las células; los elementos vasculares aún cuando fueron fuertemente colonizados, resistieron totalmente al ataque.

Las muestras preservadas con sales CCA no fueron colonizadas por *G. trabeum* durante todo el período de incubación.

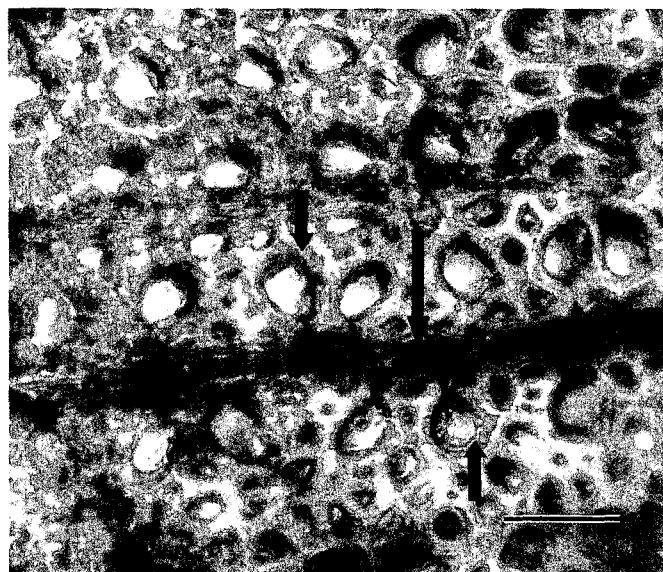


Fig. 17. Ataque de *G. trabeum* sobre madera de drgo no tratada después de 4 meses de incubación. Las flechas pequeñas señalan erosión de la capa S_2 de la pared celular, la flecha grande erosión de las células del parénquima radial. Observaciones con microscopio óptico, barra: 20 μm .

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

fue más acrecentada durante este período, generando una mayor producción y ensanchamiento de agujeros de penetración.

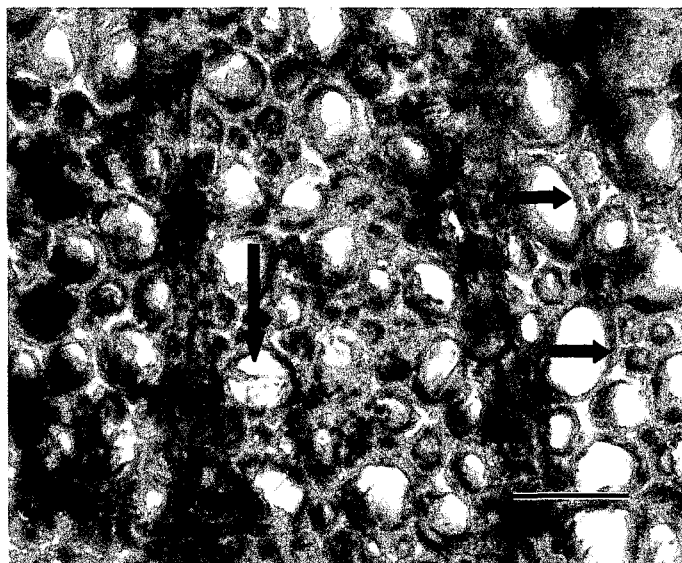


Fig. 18. Ataque de *T. versicolor* sobre madera de drgo no tratada después de 4 meses de incubación. Las flechas pequeñas señalan disminución del espesor de la pared celular, la flecha grande señala hifas del hongo dentro de las cavidades celulares. Observaciones con microscopio óptico, barra: 20 μ m.

P. sanguineus colonizó inicialmente la madera de drago vía elementos vasculares, parénquima radial, parénquima axial y en menor proporción a través de las fibras. Después de finalizar el primer mes de incubación, se observaron hifas abundantes en la mayoría de las células; sin embargo, las células del parénquima radial y axial presentaron erosión de las paredes celulares mucho más pronunciada que en las fibras. Hifas abundantes con fíbulas, originaron la producción de agujeros de penetración y ensanchamiento de algunas punteaduras del parénquima axial. Estos patrones de crecimiento se mantuvieron hasta después de culminar el segundo período de incubación, donde el ataque fue concentrado sobre las células parenquimatosas, ocasionando la total destrucción de los radios y en menor grado la degradación del parénquima axial.

Durante el tercer y cuarto mes de incubación, la degradación de las paredes celulares de las fibras fue más acentuada, originada por una erosión gradual desde la superficie del lumen hacia la lámina media, observándose generalmente una zona de lisis alrededor de toda la

T. versicolor colonizó la madera no tratada de drago a través de los vasos, parénquima radial y axial. Al finalizar el primer mes de incubación, estos tejidos fueron ampliamente colonizados por las hifas del hongo. Sin embargo, el ataque fue confinado hacia los radios y parénquima axial, los cuales fueron levemente erosionados. Aún cuando las fibras fueron escasamente colonizadas y se desarrollaron pocas hifas en los lúmenes, las paredes celulares para este período presentaron evidencias claras de erosión, localizadas generalmente áreas adyacentes a las hifas.

Luego de finalizar el segundo mes de incubación, la erosión de las paredes celulares fue mucho más fuerte, sobre todo en las células de la madera tardía donde se observó adelgazamiento del espesor de la capa S₂, sin producirse una modificación de birefringencia de las células. Hifas numerosas dentro de las cavidades celulares generaron abundantes agujeros de penetración y ensanchamiento de algunas punteaduras. En este período, el ataque fue concentrado hacia las células del parénquima axial y radial, resultando el primero de estos seriamente erosionado. Estos patrones de ataque se mantuvieron de igual forma hasta el final del tercer mes de incubación.

Después del último mes, la madera ya presentaba síntomas externos visibles a simple vista de pudrición avanzada, separándose fácilmente la probeta en dos partes en sentido longitudinal al momento de la manipulación para realizar los cortes. Al hacer las observaciones microscópicas, se notó la total destrucción del parénquima radial y axial, así como una fuerte erosión de las paredes celulares desde el lumen hacia la lámina media, la cual en algunos casos resultó seriamente degradada.

La zona de lisis fue siempre mayor en las adyacencias a las hifas, sin embargo, también se pudo observar ciertas células donde la erosión abarcaba toda la circunferencia de la pared celular, disminuyendo el espesor de las mismas (Fig. 18). Aún cuando las hifas se presentaron abundantemente dentro de los elementos vasculares, éstos no mostraron erosión de sus paredes. La penetración directa de la pared celular de la madera de drago,

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

pared, generando una disminución del espesor de las paredes de la mayoría de las fibras y en algunos casos ruptura de la pared. Los elementos vasculares fueron escasamente erosionados, en tanto que la cantidad de agujeros de penetración, así como el ensanchamiento de las punteaduras del parénquima axial fueron mayores durante el último mes de incubación.

5.5.3. Observaciones sobre curarire

G. trabeum colonizó la madera de curarire a través de los elementos vasculares sólo después del segundo mes de incubación. Sin embargo, aún cuando muy pocas hifas lograron establecerse en los diferentes tejidos de la madera, éstos no presentaron síntomas de erosión ni pérdida de la birefringencia durante todo el período de incubación.

T. versicolor y *P. sanguineus* colonizaron la madera de curarire vía vasos y parénquima radial. Después de finalizar el primer mes de incubación, hifas muy delgadas con fibulas comenzaron a desarrollarse dentro de los elementos vasculares, y en menor proporción en los radios y las fibras, produciendo escasamente una leve erosión de las paredes celulares de algunas células. Estos patrones de crecimiento se mantuvieron hasta la finalización de todo el período de incubación, sin producirse cambios significativos en la degradación de los diferentes tejidos de la madera. Cabe destacar, que al final del último periodo se observó una disminución en la cantidad de hifas dentro de los vasos y lúmenes de las células.

VI. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

6.1. Colonización de los bloques de madera

Las diferentes formas de colonización de los bloques de madera experimentadas por *G. trabeum*, *T. versicolor* y *P. sanguineus* dependieron principalmente del tipo de madera así como de la capacidad degradante individual de cada hongo. El crecimiento abundante y vigoroso de *G. trabeum* sobre las probetas de pino caribe estuvo asociado a la afinidad que tienen los hongos de pudrición marrón sobre las maderas coníferas. Sin embargo, es conocido que este hongo tiene la capacidad de atacar algunas latifoliadas (Eaton y Hale, 1993), lo cual explica el crecimiento abundante sobre la madera de drago y en menor proporción sobre curarire, caracterizada por ser una madera con alta durabilidad natural, muy resistente al ataque de hongos (Woods of the world, 1997).

Los hongos de pudrición blanca *T. versicolor* y *P. sanguineus*, colonizaron fácilmente en la mayoría de los casos los bloques de maderas latifoliadas. Se sabe que estos hongos tienen preferencias por maderas latifoliadas motivado al tipo de lignina presente (Eaton y Hale, 1993). Varios estudios han demostrado que la lignina tipo guayacil es más difícil de degradar que la lignina tipo siringil por los hongos de pudrición blanca (Eriksson et al., 1990). Esta observación puede explicar la poca ocurrencia de los hongos de pudrición blanca sobre coníferas que tienen solo lignina tipo guayacil (Highley, 1983; Blanchette et al., 1990). No obstante, estos hongos también tienen la capacidad de degradar maderas de coníferas; *T. versicolor* es encontrado ocasionalmente creciendo sobre tocones de coníferas (Eaton y Hale, 1993) y la cepa de *P. sanguineus* utilizada en la presente investigación fue aislada de carpoforos colectados sobre tocones y rolas abandonadas de pino caribe en las plantaciones al oriente del país (Bracamonte, 1992).

Las sales CCA inhibieron totalmente el crecimiento de *G. trabeum*, *T. versicolor* y *P. sanguineus* sobre las tres maderas estudiadas aún en el porcentaje de concentración más bajo (5 %), debido a las altas retenciones alcanzadas para el pino caribe (15,49 k/m³) y

drago ($12,03 \text{ k/m}^3$). En la madera de curariré, aún cuando los valores de retención fueron mucho más bajos ($1,08 \text{ k/m}^3$) debido a su difícil tratabilidad (especie refractaria), esta madera está caracterizada por presentar una alta durabilidad natural (Woods of the world, 1997).

6.2. Contenido de humedad

Las características propias de cada especie de madera, influyeron notablemente en el aumento de los valores de contenido de humedad. El análisis de varianza refleja diferencias altamente significativas entre las muestras de maderas ($p = 0,000$; $\alpha = 0,01$), presentando el valor más alto de la suma de cuadrados (12264,63), que refleja la importancia de esta variable. Pruebas de diferencia de medias utilizando el método Tukey, señalaron diferencias significativas entre las tres maderas. Se observó también un efecto de los hongos sobre el aumento en los contenidos de humedad de las maderas, diferencias altamente significativas ($p = 0,001$; $\alpha = 0,01$). El efecto no fue estadísticamente tan importante comparado con la variable madera, ya que el valor de la suma de cuadrados fue mucho más bajo (103,60) que el presentado por la variable madera. Al realizar la prueba de comparaciones de medias utilizando el método Tukey, sin embargo, se notó que no existieron diferencias estadísticamente significativas entre los tres tipos de hongos.

Se han observado al microscopio alteraciones en la matriz ligno-celulosa atribuidas a la acción enzimática de los hongos, lo que explicaría los observados cambios en la capacidad higroscópica de la pared celular. Las hifas, y la consecuente acción enzimática de los hongos de pudrición blanca como los de pudrición marrón, generaron ensanchamiento y destrucción inicialmente en la mayoría de los casos de las membranas de las punteaduras, conjuntamente, la producción de agujeros de penetración activa, producto de la penetración directa de las hifas a través de la pared celular, así como la disrupción de las células del parénquima, particularmente las del parénquima radial, produjeron el observado aumento en la permeabilidad de las maderas. Los altos contenidos de humedad observados,

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

probablemente podrían también deberse al efecto del crecimiento del micelio, el cual transportó humedad desde el suelo hasta el interior de las maderas (Jennings y Lyseck, 1996). Como otras fuentes importantes para la variación en los contenidos de humedad de las maderas, fueron los factores tratamiento e incubación, que permiten observar diferencias altamente significativas (valor de $p = 0,000$) para ambos casos a un nivel de significancia del 1 %. Análisis de comparaciones de medias utilizando el método Tukey, reflejaron diferencias significativas entre el contenido de humedad de las maderas sin tratar y las tres concentraciones del preservante utilizadas (5, 10 y 15 %), las cuales a su vez, no fueron significativamente diferentes entre sí. Las sales CCA, además de impedir la colonización de los bloques de madera, generaron posiblemente una disminución en la higroscopicidad de las mismas, restringiendo la absorción de humedad. Estas sales reaccionan principalmente con los grupos carbonil, carboxil, metoxil e hidroxil fenólicos de la lignina, hemicelulosas y holocelulosas, produciendo una absorción del preservante en la sustancia matriz (Peters y Parameswaran, 1980). Así, no se observan significativos incrementos en el contenido de humedad por efecto de la aplicación de la sal preservante.

El tiempo de incubación influye notablemente en la variación del contenido de humedad de las maderas, ya que los mayores incrementos fueron observados en los últimos períodos de incubación, período en el cual los hongos ejercieron su mayor capacidad biodegradante.

Un análisis estadístico más profundo señala que los factores madera, hongo, tratamiento e incubación no actuaron de manera independiente entre sí. La mayoría de las interacciones entre ellos reflejan diferencias altamente significativas. Ver detalles del cuadro de análisis de varianza para la variable contenido de humedad en el anexo 1.

Las variaciones en los contenidos de humedad, están relacionadas con las pérdidas de peso en las tres maderas sin tratamiento químico, mostrando una correlación significativa al 1 % de significancia (Fig. 19), aún para el caso de la madera de curarire a los niveles de pérdida de peso observados.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

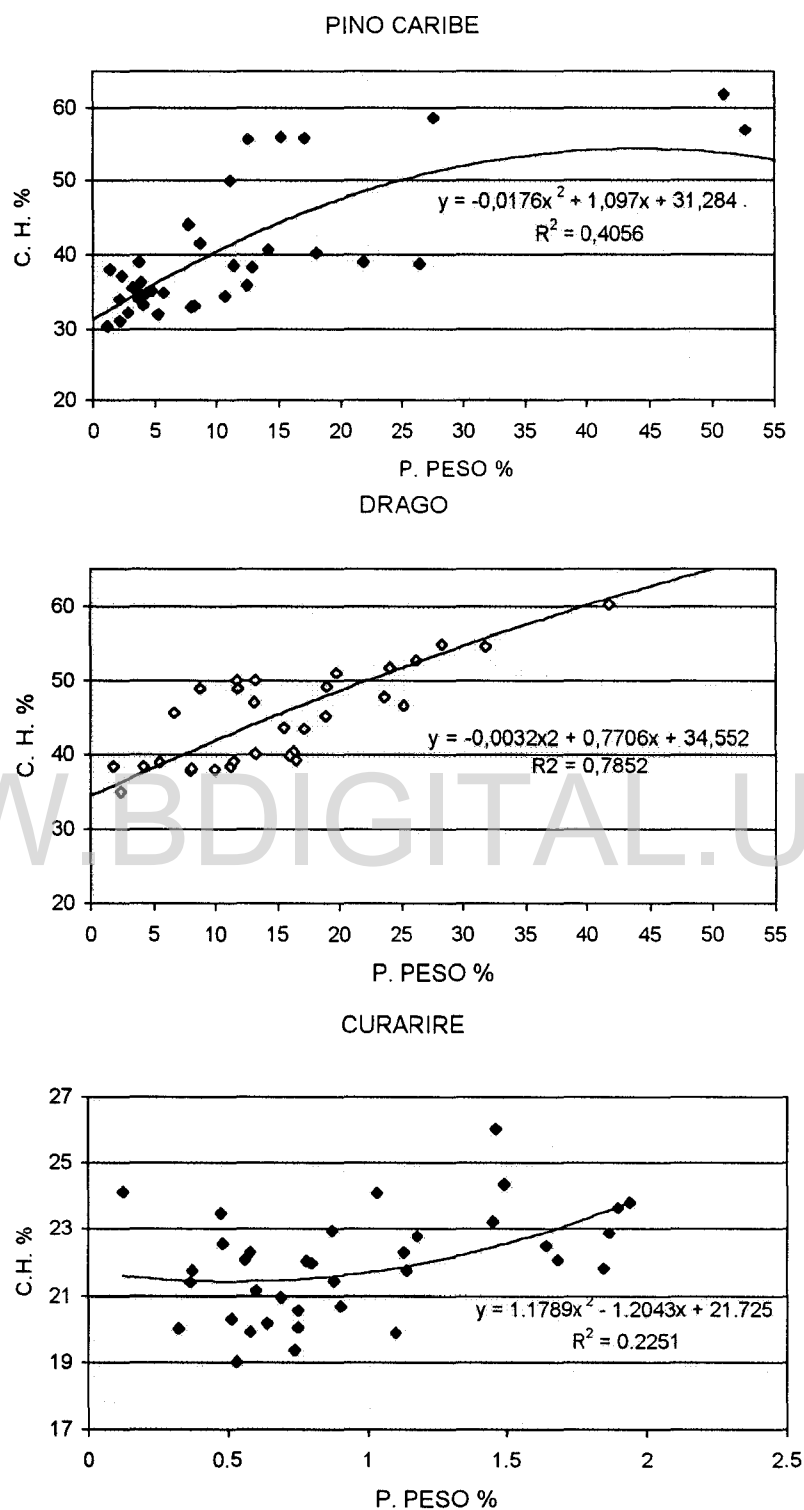


Fig. 19. Correlación entre pérdida de peso y contenido de humedad para las maderas de pino caribe, drago y curarire no tratadas.

La tendencia de las curvas de pérdida de peso-contenido de humedad para las maderas de pino caribe, drago y curarire es positiva; el mejor ajuste fue obtenido con la regresión polinomial de grado 2. En la madera de pino caribe se observa que no es posible mayor ganancia en humedad a partir del 45 % de pérdida de peso debido posiblemente a las características de la madera degradada. En la madera de drago, la tendencia señala que es posible que haya mayor contenido de humedad a medida que la pérdida de peso sea también mayor al 55 % observado. La madera de curarire, presenta también una correlación positiva entre pérdida de peso y contenido de humedad, aunque el valor del coeficiente de correlación es menor en comparación con las maderas de drago y pino caribe.

6.3. Pérdida de peso

El análisis del efecto principal de las medias de pérdida de peso (Fig. 20), mostraron la existencia directa de diferencias significativas, en las variables madera, tratamiento e incubación, más no en la variable hongo. Estas diferencias significativas fueron comprobadas mediante análisis de varianza (Anexo 2).

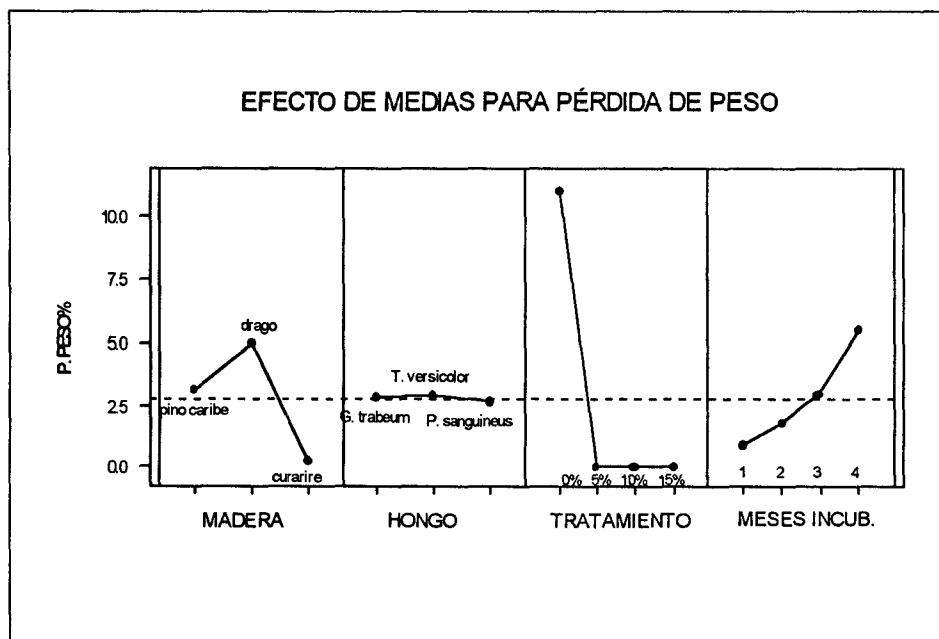


Fig.20. Efecto de medias para valores de porcentaje de pérdida de peso sobre las tres maderas, los tres hongos de prueba, las diferentes concentraciones de sales CCA y los cuatro meses de incubación.

Las características intrínsecas de cada madera resultaron tener una marcada influencia sobre sus respectivas pérdidas de peso. Los resultados de ANAVA reflejaron diferencias altamente significativas para un nivel de significación del 1 % (valor de $p = 0,000$). Mediante pruebas de comparaciones de medias utilizando el procedimiento Tukey, se determinó que no existieron diferencias significativas en la pérdida de peso entre las maderas pino caribe y drago, no obstante, estas dos especies difirieron de la madera de curarire (Fig. 20, efecto de la madera sobre la media de pérdida de peso).

La variable hongo no presentó diferencias estadísticamente significativas ($p = 0,820$) nivel de significación $\alpha = 0,01$. El análisis de varianza para la interacción entre los factores madera-hongo, aspecto más importante en experimentos factoriales (Caballero, 1976), resultó altamente significativa ($p = 0,000$) al 1 % de significación, lo que indica que estos factores no son independientes entre sí, En otras palabras, las diferencias en la pérdida de peso promedio para todas las maderas no fueron las mismas para los tres tipos de hongos, motivado a la diferencias en la acción degradante individual de *G. trabeum*, *T. versicolor* y *P. sanguineus*.

La utilización de sales CCA, tuvo un marcado efecto en la inhibición de la pérdida de peso de las tres maderas ensayadas; el análisis de varianza indicó diferencias altamente significativas para esta variable (tratamiento) con un valor de $p = 0,000$, resultando significativa al 1 %, lo que señala diferencias reales entre las medias de los tratamientos. La prueba de diferencia de medias utilizando el mismo procedimiento anterior, reflejó que las tres concentraciones del preservante utilizadas (5, 10 y 15 %) no fueron significativamente diferentes entre sí, y que la diferencia entre las medias de los tratamientos fue dada por el tratamiento 0 % (sin tratamiento químico) (Fig. 20, efecto del tratamiento sobre la media de pérdida de peso). Como consecuencia del igual efecto de las concentraciones, se puede afirmar que 5 % de concentración de CCA es suficiente para evitar la acción de estos hongos de pudrición expresado en la pérdida de peso de las maderas. La importancia del efecto de los tratamientos sobre la pérdida de peso de las maderas, fue corroborada con la interacción madera-tratamiento, la cual resultó ser altamente significativa al 1 % de

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

significación con un valor de $p = 0,000$, presentando además el más alto de valor de la suma de cuadrados de las interacciones (4885,69), lo que indica que esta interacción es la que más contribuye a la explicación del modelo.

La interacción de segundo orden madera-hongo-tratamiento resultó ser también importante, presentando en el análisis de varianza diferencias altamente significativa a un nivel de significación $\alpha = 0,01$ con un valor de $p = 0,000$, y un alto valor de suma de cuadrados (2437,91), señalando que la acción degradante de los hongos sobre las maderas difirió notablemente con los diferentes niveles del factor tratamiento.

Las pérdidas de peso para todas las maderas en general, se incrementaron gradualmente desde el primer mes de incubación; aunque fue después del tercer mes, donde el incremento fue mucho más acentuado, obteniéndose los valores más altos al final del último período de incubación. Estas diferencias en la pérdida de peso en función del tiempo de incubación, fueron analizadas estadísticamente, y el ANAVA reflejó diferencias altamente significativas ($p = 0,000$) para un $\alpha = 0,01$, indicando diferencias reales entre los meses de incubación, los cuales a su vez estuvieron relacionados con los diferentes tratamientos, como se demostró mediante la interacción incubación-tratamiento, que resultó también ser altamente significativa ($p = 0,000$) a una nivel de significación del 1 % y presentó además un alto valor de la suma de cuadrados (4008,29).

Otra interacción significativa de segundo orden importante, aunque no tanto como la anterior fue la ocasionada por los factores madera-hongo-incubación ($p = 0,000$), la cual fue significativa al 1 %. El menor valor de la suma de cuadrados de todas las interacciones estadísticamente significativas (495,37), indica que la acción degradante de los hongos sobre las maderas no fueron las mismas para todos los tiempos de incubación. Las interacciones entre factores, medidas por los efectos de las medias respecto a la variable pérdida de peso, se expresan gráficamente en la Figura 21. Detalles del cuadro de análisis de varianza para la variable pérdida de peso y las respectivas pruebas de comparaciones múltiples se detallan en el anexo 2.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

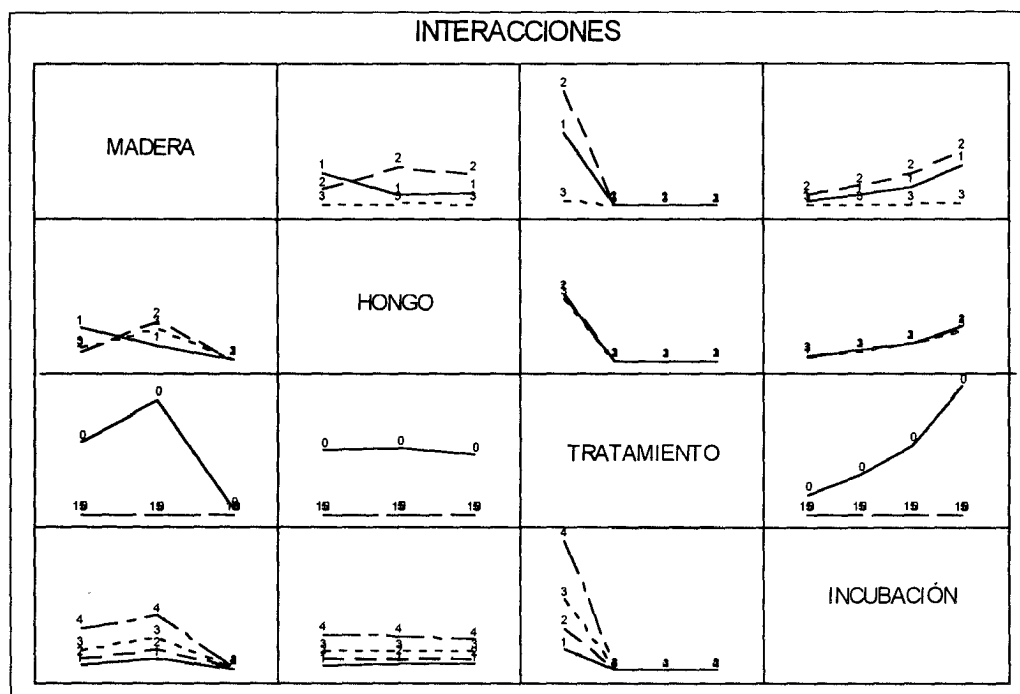


Fig. 21. Interacciones entre factores para la variable pérdida de peso.

De los tres hongos ensayados, *G. trabeum* causó el mayor porcentaje de pérdida de peso sobre la madera de pino caribe sin tratamiento después de cuatro meses de ataque (50,84 %), reflejando una baja durabilidad natural de esta madera frente a los hongos de pudrición marrón. Estos resultados presentan similitud con los observados por Eriksson y colaboradores (1990), quienes reportaron 57,20 % de pérdida de peso en *Pinus* sp. después de 12 semanas de incubación con *G. trabeum*. Jellison et al. (1992), utilizando el mismo hongo, obtuvo valores mucho más bajos (34,30 %) en astillas de spruce (*Picea abies*) empleando el método del soil-block después de 4 meses de incubación. Los hongos de pudrición blanca *T. versicolor* y *P. sanguineus* causaron menor porcentaje de pérdida de peso en relación con *G. trabeum* en la madera de pino caribe. *T. versicolor* provocó 12,59 % de pérdida de peso mientras que *P. sanguineus* 19,94 % después del último período de incubación, indicando una mayor relativa resistencia natural del pino caribe a los hongos de pudrición blanca en comparación con el hongo de pudrición marrón. Estos resultados son consecuentes con lo obtenidos por Wangaard et al. (1955), quienes reportaron 13,8 % como valores máximos de pérdida de peso en pino caribe proveniente de

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Honduras, empleando la prueba de agar-block después de 12 semanas de incubación con *T. versicolor*. La madera de pino caribe ensayada en el presente experimento, proviene de las plantaciones de El Irel (Edo. Barinas), Venezuela; y el ensayo se efectuó mediante la técnica del soil/block. Existe concordancia en consecuencia con la similar pérdida de peso del pino caribe frente a este hongo. Con otras coníferas se han observado diferencias apreciables cuando son inoculadas con *T. versicolor* después de 12 semanas de incubación siguiendo los procedimientos de la prueba de soil-block Kirk y Highley (1993); los porcentajes de pérdida de peso fueron: *Tsuga heterophylla* 18%, *Picea glauca* 35 %, *Picea sitchensis* 20 %, *Pinus tadea* 34 % y *Pinus monticola* 50 %. Osfrotsky et al. (1997) por otra parte, observaron 61 % de pérdida de peso en *Picea rubens* Sarg. inoculadas con *T. versicolor* después de 8 meses de incubación, empleando una modificación del método ASTM soil-block.

En la madera drago, los mayores porcentajes de pérdida de peso después del último mes de incubación fueron producidos por los hongos de pudrición blanca *T. versicolor* (53,32 %) y *P. sanguineus* (38,58 %), notándose una marcada influencia de la acción degradante individual de los hongos. Los valores de pérdidas de peso con *T. versicolor*, se encuentran dentro de los obtenidos por Hess et al. (1950) en la misma especie (41,30 % como valor promedio y 69,10 % como valor máximo después de 16 semanas de incubación en cultivos puros o agar-block), así como con los obtenidos por Mayorca (1976), quien reportó 74,40 % de pérdida de peso con el método de agar-block, sin embargo, difiere de los obtenidos por la misma autora en pruebas de soil-block (40,03 %) para madera de drago inoculada con *T. versicolor*. Este hongo ha mostrado gran afinidad para degradar maderas latifoliadas. Pohleven y Petric (1997), observaron 61,31 % de pérdida de masa en beech (*Fagus sylvatica*) así como 17,75 % en duramen y 31,42 % en albura de *Eucalyptus saligna* después de 4 meses de incubación mediante estándares europeos (EN 113).

El hongo de pudrición marrón *G. trabeum* causó de igual forma una pérdida de peso significativa sobre la madera de drago (19,96 %). Este resultado también difiere de los obtenidos por Mayorca (1976), quien observó marcadas diferencias entre los dos métodos

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

utilizados en madera de drago e inoculada con *G. trabeum*, reportando 18,50 % en agar-block y 74,40 % en soil-block después de 16 semanas de incubación. Pohleven y Petric (1997), utilizando los estándares europeos (EN 113), observaron 38,94 % de pérdida de peso en beech (*Fagus silvatica*), 19,47 % en el duramen y 17,50 % en la albura de *Eucalyptus saligna* después de 4 meses de incubación con *G. trabeum*.

La madera de curarire fue la que presentó menor porcentaje de pérdida de peso de las tres maderas ensayadas después de 4 meses de incubación. *G. trabeum* sólo produjo una leve pérdida de peso, escasamente 1,03 %, al igual que *T. versicolor* y *P. sanguineus* 1,68 % y 1,81 % respectivamente. Estos resultados confirman las observaciones de Mayorca (1970), que obtuvo valores parecidos con los tres hongos, lo que en definitiva señala la alta resistencia de esta especie tanto a los hongos de pudrición marrón como a los hongos de pudrición blanca.

Las diferencias observadas en los resultados entre estudios previos y el presente, reflejan diferencias en la composición anatómica y características químicas de las maderas, en el poder de degradación enzimática de los hongos, así como en la diferencia de las cepas utilizadas. Algunas características de las maderas de pino caribe, drago y curarire son descritas en el anexo 3; las características de los hongos se describen en el anexo 4.

6.4. Patrones de crecimiento

La estructura y composición química de las maderas, tuvieron un marcado efecto sobre su degradación y sobre los patrones de crecimiento resultantes del ataque de los hongos. El tipo de célula, composición química y morfología de la pared celular pueden gobernar los efectos de las enzimas sobre la estructura de la madera (Eriksson et al., 1990). En el modo inicial de ataque, *G. trabeum* fue menos selectivo que *T. versicolor* y *P. sanguineus*, logrando colonizar la mayoría de los tejidos de las maderas. Es conocido que los hongos de pudrición marrón generalmente se establecen en todas las células de la madera en las primeras etapas de colonización (Zabel y Morrell, 1992).

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

La producción de oxalatos de calcio por parte de *G. trabeum* en la madera de pino caribe, ha sido encontrada también en pino ponderosa producido por este mismo hongo (Sexton y Morrell, 1992). Es conocido que los hongos de pudrición marrón son capaces de producir cantidades considerables de oxalatos de calcio (Jellison et al., 1997); sin embargo, éstos también pueden ser producidos por hongos de pudrición blanca (Connolly y Jellison, 1995). La función de la producción de estos cristales de calcio no está del todo entendida, éstos pueden ser originados por el metabolismo de productos de desecho, o puede ser debido a que el calcio presente en la madera es 100 % cambiante (Connolly y Jellison, 1994). La colonización de la madera por hongos de pudrición marrón puede ser facilitada por la destrucción de las membranas de las punteaduras y células del parénquima radial (Jellison et al., 1997); es conocido que el ataque a estos tejidos está basado sobre la producción de ácido oxálico y la actividad de las enzimas polygalacturonasas. Es posible que en este proceso el calcio sea removido hacia formas insolubles de cristales de oxalatos de calcio (Green et al., 1995). La producción de ácido oxálico ha sido propuesta como uno de los mecanismos por los cuales los hongos de pudrición marrón inician el deterioro de la madera (Schmidt et al., 1981). El ácido oxálico es producido por los hongos para modificar el pH de su propio ambiente dentro de la madera, creando un gradiente desde las hifas hacia la pared celular, lo cual ayuda a impedir la reactividad de los radicales hidroxilos, facilitando el ataque de los hongos (Goodell y Jellison, 1997).

G. trabeum, *T. versicolor* y *P. sanguineus* concentraron su ataque inicial en mayor proporción hacia las células del parénquima axial y radial en las latifoliadas, así como el parénquima radial y canales resiníferos en la conífera. La degradación de células parenquimáticas se explica, puesto que están constituidas principalmente por almidones, azúcares y proteínas, los cuales son compuestos fácilmente asimilables por los hongos (Zabel y Morrell, 1992), por otra parte, las células epiteliales que rodean los canales resiníferos están compuestas principalmente de células no lignificadas fácilmente degradadas por la acción enzimática de los hongos (Rayner y Boddy, 1988).

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Los hongos de pudrición blanca *T. versicolor* y *P. sanguineus* colonizaron inicialmente la madera de pino caribe similarmente, a través del parénquima radial y canales resiníferos; sin embargo, éstos mostraron diferencias en cuanto a sus capacidades de degradación. *P. sanguineus* degradó más violentamente la madera desde los primeros meses de incubación, mostrando gran afinidad por este sustrato; mientras que la degradación causada por *T. versicolor* fue sólo claramente evidente en los últimos meses de incubación. La principal vía de colonización entre células vecinas a través de punteaduras en los estados incipientes de pudrición experimentada por *G. trabeum*, así como la producción de agujeros de penetración en las etapas más avanzadas han sido observados de igual manera por otros investigadores (Wilcox, 1970; Liese, 1970). El desarrollo de cavidades o agujeros de penetración longitudinales en la capa S₂ similares a los desarrollados por *G. trabeum* en la madera de pino caribe han sido observados en otras maderas, producidos tanto por hongos de pudrición marrón como por hongos de pudrición blanca (Wilcox, 1970). Sin embargo, esta característica es poco común, ya que la penetración directa de la pared se realiza generalmente en sentido transversal (Daniel 1998 comunicación personal).

El colapso de la pared celular en la madera de pino caribe y drago causado por *G. trabeum*, refleja el fuerte ataque sobre los componentes celulolíticos de la pared celular, específicamente sobre las cadenas de celulosas y hemicelulosas (Eaton y Hale, 1993), originando una rápida disminución en sus grados de polimerización, la cual fue evidenciada por la clara pérdida de la birefringencia en la capa S₂ de la pared celular desde las etapas iniciales de pudrición. En curarire, aún cuando el crecimiento de *G. trabeum* sobre los bloques de alimentación fue más o menos abundante durante el primer mes de incubación, éste utilizó las probetas solamente como soporte para su desarrollo, ya que internamente no fue sino hasta después de finalizar el segundo mes de incubación, cuando escasas hifas lograron penetrar vía vasos y radios sin causar ningún tipo de erosión sobre las células, lo que indica alta resistencia de esta madera al ataque de los hongos de pudrición marrón.

Los patrones de crecimiento de los hongos de pudrición blanca *T. versicolor* y *P. sanguineus* sobre las maderas de pino caribe y drago, originaron una degradación

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

gradual desde el lumen hacia la lámina media, produciendo una disminución en el espesor de las paredes como resultado del ataque simultáneo sobre los componentes principales de la pared celular: celulosa, hemicelulosa y lignina. Cabe destacar, que la zona de lisis originada por el ataque de *T. versicolor*, estuvo inicialmente relacionada a las adyacencias de las hifas, pero a medida que continuó el ataque, toda la circunferencia de las paredes fue afectada. Estos patrones de crecimiento experimentados por *T. versicolor* en las maderas de pino caribe y drago, han sido observados de igual forma sobre *Picea mariana* (Blanchette et al., 1990); y sobre *Pinus strobus* (Eriksson et al., 1990).

En drago, las hifas se desarrollaron ampliamente a través de los vasos resistiendo totalmente al ataque. Solamente *P. sanguineus* logró causar una leve erosión al final del último período de incubación. Estas observaciones son consistentes con estudios previos (Eriksson et al., 1990) y confirman que dentro de las latifoliadas, las fibras y las células del parénquima radial pueden ser totalmente degradadas, mientras que los vasos permanecen relativamente libres de ataque, lo cual se atribuye a las altas concentraciones de lignina dentro de las células de los vasos, así como al tipo de lignina presente; los vasos poseen una mayor cantidad de lignina tipo guayacil que siringil respecto a otros componentes celulares (Blanchette et al., 1990).

En términos generales, en la madera de latifoliadas, las vías de penetración inicial, así como los patrones de crecimiento de *T. versicolor* y *P. sanguineus* fueron diferentes. *T. versicolor* colonizó la madera de drago a través de los vasos, parénquima radial y axial, mientras que *P. sanguineus* lo hizo además sobre las fibras. No obstante, cabe destacar que ambos hongos degradaron fuertemente la madera, ocasionando una erosión de las paredes celulares y la destrucción casi total del parénquima radial y axial. En la madera de curarire, aún cuando pocas hifas lograron colonizar levemente la madera, éstas no produjeron erosiones significantes en ningunos de los tejidos, demostrando también la resistencia natural de esta madera contra hongos de pudrición blanca.

Las sales CCA causaron una acción fungitóxica sobre los tres hongos de prueba,

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

impidiendo totalmente la colonización de las maderas aún en la menor concentración utilizada (5 %). Inmediatamente después del tratamiento, las sales CCA incrementan el pH dentro de la madera mediante reacción iónica, impidiendo el desarrollo de los microorganismos (Daniel y Nilsson, 1989). El sitio de crecimiento de los hongos, en relación con la microdistribución del preservante es de real importancia; las sales CCA ejercen su acción tóxica sobre hongos Basidiomycetes en la superficie del lumen de la pared celular (Rayner y Boddy, 1988).

La reacción inicial de las CCA con la madera genera complejos de cromo hexavalente con la lignina, seguido por una reducción del cromo a cromo trivalente; el cobre también reacciona directamente con la madera por intercambio iónico, ocurriendo entonces una serie de reacciones de condensación que dan origen a un conjunto de complejos como el arsenato de cromo, arsenato de cobre, cromo cobre, y quizás arsenato de cobre y cromo (Preston y Jin, 1991). Mientras algunos de estos complejos pueden ser asociados con algunos componentes de la madera a través de complejos covalentes, otros son fijados por insolubilización dentro de la estructura de la madera. La formación de complejos entre el arsenato y la madera es posible pero no está documentado (Preston y Jin, 1991). En todos los casos, tales compuestos impiden la degradación de los componentes de la pared celular por acción microbiana.

Una de las principales características de las sales CCA es su capacidad para fijarse dentro la madera, este aspecto ha sido estudiado ampliamente por diferentes investigadores (Preston y Mckain, 1983; Forsyth y Morrell, 1990; Cooper y Ung, 1992; Cruz, 1995). Tal fijación explica porqué los hongos no pueden utilizar los radicales libres de la madera, los cuales están íntimamente unidos mediante enlaces químicos a los componentes químicos que conforman las sales CCA (Anderson et al., 1991).

VII. CONCLUSIONES

Las sales CCA garantizan la inhibición de los procesos de biodegradación como consecuencia del ataque de hongos tanto de pudrición marrón como de pudrición blanca en las maderas de pino caribe, drago y curarire. La concentración más baja de preservante utilizada (5 %), fue suficiente para proteger estas maderas contra la acción degradante de los hongos *G. trabeum*, *T. versicolor* y *P. sanguineus* de prueba en condiciones de laboratorio.

La madera de pino caribe resultó ser más susceptible al ataque del hongo de pudrición marrón que al ataque de los hongos de pudrición blanca, mientras que la madera de drago fue principalmente degradada por los hongos de pudrición blanca. La madera de curarire, por otra parte, presentó una alta resistencia al ataque de los dos tipo de hongos, motivado a su alta durabilidad natural.

Los mayores porcentajes de pérdidas de peso en la madera de pino caribe (50,84 %) fueron ocasionados por la acción del hongo de pudrición marrón *G. trabeum*, seguido por los hongos de pudrición blanca *P. sanguineus* (19,94 %) y *T. versicolor* (12,95 %). En la madera de drago los mayores porcentajes de pérdida de peso fueron producidos por los hongos de pudrición blanca *T. versicolor* (53,32 %) y *P. sanguineus* (30,59 %), y en menor porcentaje por el hongo de pudrición marrón *G. trabeum* (19,17 %). Para la madera de curarire, el porcentaje de pérdida de peso no sobrepasó el 2 % para ninguno de los hongos de prueba.

Los hongos de pudrición marrón y pudrición blanca presentaron diferencias en cuanto al tipo de colonización inicial y patrones de degradación de las maderas. *G. trabeum*, desde la etapa incipiente de pudrición colonizó prácticamente todas las células de la madera, atacando directamente la capa S₂ de la pared celular, originando destrucción de la misma, como consecuencia de la acción enzimática del hongo, la cual causó una disminución del

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

grado de polimerización de las cadenas de celulosa y hemicelulosa, evidenciado por la pérdida de la birefringencia de la pared celular.

T. versicolor y *P. sanguineus* fueron más selectivos en sus maneras de colonizar la madera, estableciéndose inicialmente en el parénquima radial y canales resiníferos en la conífera, así como en el parénquima radial, parénquima axial y vasos en las latifoliadas. Estos hongos produjeron una disminución en el espesor de la pared celular, originado por una erosión gradual desde el lumen hacia la lámina, la cual en algunos casos fue degradada.

Las alteraciones en la matriz ligno-celulosa, como resultado de la acción enzimática de los hongos, aumentan la permeabilidad de las maderas permitiendo de esta manera un aumento considerable en el contenido de humedad, el cual a su vez está directamente relacionado con la pérdida de peso.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

VIII. RECOMENDACIONES

Como resultado de la baja durabilidad natural experimentada por las maderas de pino caribe y drago, se recomienda no emplear estas maderas sin tratamiento químico, sobre todo si van a ser utilizadas en contacto directo con el suelo. Para uso en interiores es suficiente utilizar concentraciones de CCA inferiores al 5 %, debiendo optimizarse la dosis mínima necesaria (cantidad de producto activo), factor importante para no incurrir en excesos que resultarían antieconómicos.

Es necesario realizar estudios similares al nivel de ultraestructura, mediante la utilización de microscopio electrónico, con la finalidad de obtener información más detallada de los procesos de biodegradación de maderas. Así mismo, es necesario efectuar pruebas de la acción enzimática de los hongos en las diferentes maderas, lo que contribuiría a entender mejor los procesos de biodegradación de maderas por los hongos. A este respecto se recomienda también estudiar otros hongos de pudrición blanca del tipo selectivo dentro de los hongos de prueba, y para el caso de maderas preservadas con sales CCA, utilizar hongos tolerantes al cobre.

Es conveniente complementar la información recabada en este estudio de laboratorio con ensayos de campo (cementerio de estacas), para determinar el comportamiento de estas maderas puestas en servicio, puesto que las condiciones de exposición en contacto con el suelo, son sumamente complejas biológica y físicamente. En la naturaleza actúan muchos más hongos con variadas y no estudiadas capacidades biodegradante de la madera.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alexopoulos, C. y Mims, C. 1979. Introductory Mycology. 3rd ed. Jhon Wiley & Sons, New York. 632 p.

Anderson, D.; Cornfield, J. y Williams, G. 1991. Waterbased fixed preservatives. In: The chemistry of wood preservation. Thompson CBE, Teddington. 315 p.

AWPA, 1992. American Wood-Preservers' Association. Book of Standars. 290 p.

Blanchette, R.; Nilsson, T.; Daniel, G. y Abad, A. 1990. Biological degradation of wood. Archaeological Wood 6: 141 - 174.

Bracamonte, L. 1992. Macromycetos xilófagos de las plantaciones de pino del oriente de Venezuela. Tesis de Maestría. Universidad Centrooccidental Lisandro Alvarado. Barquisimeto, Venezuela. (Mimeografiado).

Bracamonte, L. y Holmquist, O. 1995. Tratamiento por doble difusión para la preservación de fustes de la palma manaca. Revista Forestal Latinoamericana 17: 69 - 86.

Caballero, M. 1976. Estadística práctica para dasónomos. Universidad de los Andes. Facultad de Ciencias Forestales. Escuela de Ingeniería Forestal. Oficina de publicaciones. Mérida, Venezuela. 195 p.

Carlile, W. y Watkinson, S. 1994. The Fungi. Academic Press, London. 223 p.

Cassens, D.; Johnson, B.; Feist, W. y De Groot, R. 1995. Selection and use of preservative-treated wood. Forest Products Society N° 7299, Madison. 104 p.

Ceballos, J. 1995. Durabilidad relativa del cascarillo *Ocotea cymbarum* H.B.K. Tesis de Pregrado. Universidad de los Andes. Facultad de Ciencias Forestales. Escuela de Ingeniería Forestal. Mérida, Venezuela. (Mimeografiado).

Connolly, J. y Jellison, J. 1994. Oxalate production and calcium oxalate accumulation by *Gloeophyllum trabeum* in buffered cultures. The International Research Group on Wood Preservation. Stockholm, Sweden. Document IRG/WP 10075.

Connolly, J. y Jellison, J. 1995. Calcium translocation, calcium oxalate accumulation, and hyphal sheath morphology in the white-rot fungus *Resinicium bicolor*. Canadian Journal of Botany 73: 927 - 936.

Cooper, P. y Ung, Y. 1992. Accelerated fixation of CCA treated poles. Forest Products Journal 42: 27 - 92.

Clark, J. y Sheffer, T. 1983. Natural decay resistance of the heartwood of coast redwood *Sequoia sempervivens* (D. Don) Endl. Forest Products Journal 33: 15 - 20.

Cruz, f. 1995. Determination of hexavalent chromium in CCA-treated building timbers. Journal of Enviromental Science and Healt A30 (2).

Daniel, G. y Nilsson, T. 1989. Interactions between soft rot fungi and CCA preservative in *Betula verrucosa*. Journal of the Institute of Wood Science 11: 162-171.

Eaton, R. y Hale, M. 1993. Wood: Decay, pests and protection. Chapman & Hall, London. 546 p.

Encinas, O. y Daniel, G. 1995. Wood cell wall biodegradation by bluestain fungus *Botryodiplodia theobromae*. Material und Organismen 29: 255 - 272.

Encinas, O. 1996. Development and significance of attack by *Lasiodiplodia theobromae* (Pat.) Griff. & Maubl. in caribbean pine wood. Doctoral thesis. Acta Universitatis Agriculturae Sueciae. Silvestria 8. Uppsala, Sweden.

Encinas, O.; Henningsson, B.; y Daniel, G. 1998. Changes in toughness and fracture characteristic of wood attacked by the blue stain fungus *Lasiodiplodia theobromae*. Holzforschung 52: 82 - 88.

Eriksson, K.; Grünewald, A.; Nilsson, T. y Vallyen, L. 1980. A scanning electron microscopy study of the grown and attack on wood by tree white-rot fungi and their cellulose-less mutants. Holzforschung 34: 207 - 213.

Eriksson, K.; Blanchette, R. y Ander, P. 1990. Microbial and enzymatic degradation of wood and wood components. Springer-Verlag, Berlin, 407 p.

Findlay, D. 1985. Preservation of timber in the tropic. Martinus/Junk Publisher, The Netherlands. 273 p.

Forsyth, P. y Morrell, J. 1990. Hexavalent chromium reduction in CCA treated sawdust. Forest Products Journal 40: 48 - 50.

Gilbertson, R. y Ryvarden, L. 1986. North american polypores. Vol. 1. Fungiflora, Oslo. 433 p.

Gilbertson, R. y Ryvarden, L. 1987. North american polypores. Vol. 2. Fungiflora, Oslo. 448 p.

Goodell, B. y Jellison, J. 1997. Wood degradation mechanisms by the brown rot fungus *Gloeophyllum trabeum*. The International Research Group on Wood Preservation. Stockholm, Sweden. Document IRG/WP 10229.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Green, F.; Clausen, C.; Kuster, T. y Highley, T. 1995. Induction of polygalacturonase and the formation of oxalic acid by pectin in brown-rot fungi. *World Journal of Microbiology and Biotechnology* 11: 519 - 524.

Hess, R.; Wangaard, F. y Dickinson, F. 1950. Properties and uses of tropical woods. Yale University. School of Forestry II (97): 93 - 95.

Haygreen, L. y Bowyer, J. 1994. Forest products and wood science. An introduction. 2nd ed. Iowa State University Press/Ames, Iowa. 500 p.

Highley, T. 1983. Influence of type and amount of lignin on decay by *Coriolus versicolor*. *Canadian Journal Forest Research* 12: 435 - 438.

Hong, L. y Yamamoto, K. 1989. A note on a laboratory method for estimating durability of some tropical hardwoods. *Journal Tropical Forest Science* 2: 167 - 170.

Jellison, J.; Smith, K.; Shortle, W. 1992. Cation analysis of wood degraded by white- and brown-rot fungi. The international Research Group on Wood Preservation. Stockholm, Sweden. Document IRG/WP 1552.

Jellison, J.; Connolly, J.; Goodell, B.; Doyle, B.; Illman, B.; Fekete, F. y Ostrofsky, A. 1997. The role of cations in the biodegradation of wood by the brown rot fungi. ELSEVIER Article N° 1312.

Jennings, D. y Lysek, G. 1996. Fungal biology. Understanding the fungal lifestyle. BIOS Scientific Publisher, Oxford. 156 p.

JUNAC, 1988. Manual del Grupo Andino para la Preservación de Maderas. Junta del Acuerdo de Cartagena, Lima. 408 p.

Kamdem, D.; Gruber, K. y Freman, M. 1995. Laboratory evaluation of the decay resistance of red oak (*Quercus rubra*) pressure treated with copper naphthenate. Forest Products Journal 45: 74 - 76.

Kollmann, F. y Côté, W. 1968. Principles of wood science and technology. Solid wood. Springer-Verlag, Berlin. 592 p.

Liese, W. 1970. Ultrastructural aspects of woody tissue desintegrations. Annual Review of Phytopathology 8: 231 - 258.

Nilsson, T. y Daniel, G. 1989. Chemistry and microscopy of wood decay by some higher Ascomycetes. Holzforschung 43: 11 - 18.

Nobles, M. 1965. Identification of cultures of wood-inhabiting Hymenomycetes. Canadian Journal of Botany 43: 1097 - 1139.

Mayorca, L. 1972. Durabilidad de 32 maderas de los altos llanos occidentales de Venezuela. Laboratorio Nacional de Productos Forestales. Mérida, Venezuela. (Mimeografiado).

Mayorca, L. 1972. Durabilidad natural de 115 maderas de la Guayana Venezolana. Revista Forestal Venezolana 22: 27 - 36.

Mayorca, L. 1976. Estudio de durabilidad de 17 maderas de la región centro occidental de Venezuela. Revista Forestal Venezolana 26: 61 - 72.

Okoro, S.; Gertjeansen, R. y French, D. 1984. Influence of natural durability, laboratory weathering, resin content and ammoniacal copper arsenate treatment on the decay resistance of african hardwood. Forest Products Journal 34: 41 - 48.

Panshin, A. y de Zeeuw, C. 1970. Textbook of wood technology. 3rd ed. McGraw-Hill, New York. 705 p.

Peters, G. y Parameswaran, N. 1980. Transmission electron microscopical localization of salt preservatives components in wood cell walls. Wood Science and Technology 14: 81 - 88.

Pohleven, F. y Petric, M. 1997. Resistance of the wood of *Eucalyptus saligna* and *Paulownia tomentosa* against some wood rotting fungi. The international Research Group on Wood Preservation. Stockholm, Sweden. Document IRG/WP 10238.

Preston, A. y Mckain, P. 1983. Effect of accelerated fixation on decay of CCA-treated wood. Forest Products Journal 33: 41 - 44.

Preston, A. y Jin, L. 1991. Wood chemical interactions y their effect on preservative performance. In: The chemistry of wood preservation. Thompson CBE, Teddington. 315 p.

Rayner, A. y Boddy, L. 1988. Fungal decomposition of wood. Its biology and ecology. John Wiley & Sons, London. 587 p.

Reis, M. 1972. Decay resistance of six wood species from the Amazonian Basin of Brazil. Phytopathology 32: 788.

Richardson, B. 1978. Wood preservation. The Construction Press, Lancaster. 238 p.

Ryvarden, L. 1955. Sistemática y ecología de Basidiomycetes lignícolas. Curso de Postgrado. Universidad Simón Bolívar. Caracas, Venezuela. (Mimeografiado).

Schmidt, C.; Whitten, B. y Nicholas, D. 1981. A proposed role for oxalic acid in nonenzymatic wood decay by brown-rot fungi. American Wood Preservers' Association 77: 157 - 164.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Sexton, C. y Morrell, J. 1992. Effects of *Trichoderma harzianum* on enzyme activity and oxalic acid production of *Gloeophyllum trabeum* in Ponderosa pine sapwood block. The International Research Group on Wood Preservation. Stockholm, Sweden. Document IRG/WP 1550.

Silverborg, S.; Mayorca, L. y Conejos, J. 1970. Durabilidad relativa de algunas maderas venezolanas. Revista Forestal Venezolana 19: 61 - 72.

Singh, A. y Kim, Y. 1997 Biodegradation of wood in wet environments. The international Research Group on Wood Preservation. Stockholm, Sweden. Document IRG/WP 10217.

Sjöström, E. 1981. Wood chemistry fundamentals and applications. Academic Press, London. 223 p.

Wangaard, F.; Koehler, A. y Muschler, A. 1955. Properties and uses of tropical woods. Yale University. School of Forestry IV(99): 155 - 162.

Wilcox, W. 1970. Anatomical changes in wood cell walls attacked by fungi and bacteria. The Botanical Review 36: 133 - 174.

Willeitner, H. y Liese, W. 1992. Wood protection in tropical countries. A manual on the know-how. Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ), GmbH. Eschborn. 228 p.

Woods of the world, 1997. <http://www.windsorplywood.com/woodsoftheworld/>

Zabel, R. y Morrell, J. 1992. Wood microbiology. Decay and its prevention. Academic Press, San Diego. 476 p.

ANEXOS

Anexo 1. Detalle del cuadro de ANAVA y pruebas de comparaciones múltiples para la variable contenido de humedad (salidas del paquete estadístico Minitab bajo Windows versión 10.2).

MTB > Retrieve 'A:\Datos.MTW'.

Retrieving worksheet from file: A:\Datos.MTW

MTB > ANOVA 'C.H.%' = &

Analysis of Variance (Balanced Designs)

Factor	Type	Levels	Values
MADERA	fixed	3	1 2 3
HONGO	fixed	3	1 2 3
TRATA.	fixed	4	0 5 10 15
INCUB.	fixed	4	1 2 3 4

Analysis of Variance for C.H.%

Source	DF	SS	MS	F	P
MADERA	2	12264.63	6132.31	851.86	0.000
HONGO	2	103.60	51.80	7.20	0.001
TRATA.	3	7773.73	2591.24	359.96	0.000
INCUB.	3	1147.56	382.52	53.14	0.000
MADERA*HONGO	4	263.87	65.97	9.16	0.000
MADERA*TRATA.	6	4570.73	761.79	05.82	0.000
MADERA*INCUB.	6	228.78	38.13	5.30	0.000
HONGO*TRATA.	6	48.83	8.14	1.13	0.344
HONGO*INCUB.	6	171.18	28.53	3.96	0.001
MADERA*HONGO*TRATA.	12	167.33	13.94	1.94	0.029
MADERA*HONGO*INCUB.	12	162.98	13.58	1.89	0.035
HONGO*TRATA.*INCUB.	18	399.27	22.18	3.08	0.000
TRATA.*INCUB.	9	1530.03	170.00	23.62	0.000
Error	342	2461.96	7.20		
Total	431	31294.47			

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

MTB > Oneway 'C.H.%' 'MADERA';

SUBC> Tukey 5.

One-Way Analysis of Variance

Analysis of Variance on C.H.%

Source	DF	SS	MS	F	p
MADERA	2	12264.6	6132.3	138.24	0.000
Error	429	9029.8	44.4		
Total	431	31294.5			

				Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev		
Level	N	Mean	StDev	-----+-----+-----+-----		
1	144	29.386	6.940	(-*-)		
2	144	35.314	8.966	(--*-)		
3	144	22.280	2.127	(--*-)		
				-----+-----+-----+-----		
Pooled StDev = 6.660				25.0	30.0	35.0

Tukey's pairwise comparisons

Family error rate = 0.0500

Individual error rate = 0.0195

Critical value = 3.31

Intervals for (column level mean) - (row level mean)

	1	2
2	-7.766	
	-4.091	
3	5.268	11.197
	8.942	14.871

MTB > Oneway 'C.H.%' 'HONGO';

SUBC> Tukey 5.

One-Way Analysis of Variance

Analysis of Variance on C.H.%

Source	DF	SS	MS	F	p
HONGO	2	103.6	51.8	0.71	0.491
Error	429	31190.9	72.7		
Total	431	31294.5			

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

				Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev			
Level	N	Mean	StDev	-----+-----+-----+-----+-----			
1	144	28.749	7.325	(-----*-----)			
2	144	28.555	8.887	(-----*-----)			
3	144	29.677	9.246	(-----*-----)			
Pooled StDev = 8.527				-----+-----+-----+-----+-----	27.6	28.8	30.0 31.2

Tukey's pairwise comparisons

Family error rate = 0.0500

Individual error rate = 0.0195

Critical value = 3.31

Intervals for (column level mean) - (row level mean)

	1	2
2	-2.158	2.546
3	-3.280	-3.474
	1.424	1.230

MTB > Oneway 'C.H.%' 'TRATA';

SUBC> Tukey 5.

One-Way Analysis of Variance

Analysis of Variance on C.H.%

Source	DF	SS	MS	F	p
TRATA.	3	7773.7	2591.2	47.15	0.000
Error	428	23520.7	55.0		
Total	431	31294.5			

				Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev			
Level	N	Mean	StDev	-----+-----+-----+-----			
0	108	36.323	12.823	(---*---)			
5	108	26.505	4.099	(--*---)			
10	108	26.987	4.597	(--*---)			
15	108	26.159	4.177	(--*---)			
Pooled StDev = 7.413				-----+-----+-----+-----	28.0	32.0	36.0

Tukey's pairwise comparisons

Family error rate = 0.0500

Individual error rate = 0.0105

Critical value = 3.63

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Intervals for (column level mean) - (row level mean)

	0	5	10
5	7.229		
	12.407		
10	6.747	-3.071	
	11.926	2.108	
15	7.575	-2.243	-1.761
	12.754	2.936	3.417

MTB > Oneway 'C.H.%' 'INCUB.';

SUBC> Tukey 5.

One-Way Analysis of Variance

Analysis of Variance on C.H.%

Source	DF	SS	MS	F	p
INCUB.	3	1147.6	382.5	5.43	0.001
Error	428	30146.9	70.4		
Total	431	31294.5			

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev	
1	108	26.927	5.810	(-----*-----)
2	108	28.273	6.759	(-----*-----)
3	108	29.400	8.359	(-----*-----)
4	108	31.374	11.508	(-----*-----)

-----+-----+-----+-----
Pooled StDev = 8.393 27.5 30.0 32.5

Tukey's pairwise comparisons

Family error rate = 0.0500

Individual error rate = 0.0105

Critical value = 3.63

Intervals for (column level mean) - (row level mean)

	1	2	3
2	-4.278		
	1.585		
3	-5.405	-4.059	
	0.458	1.804	
4	-7.379	-6.033	-4.906
	-1.516	-0.170	0.957

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Anexo 2. Detalle del cuadro ANAVA y pruebas de comparaciones múltiples para la variable pérdida de peso (salidas del paquete estadístico Minitab bajo Windows versión 10.2).

MTB > Retrieve 'A:\Datos.MTW'.
Retrieving worksheet from file: A:\Datos.MTW
MTB > ANOVA 'P. PESO%' = &

Analysis of Variance (Balanced Designs)

Factor	Type	Levels	Values			
MADERA	fixed	3	1	2	3	
HONGO	fixed	3	1	2	3	
TRATA.	fixed	4	0	5	10	15
INCUB.	fixed	4	1	2	3	4

Analysis of Variance for P. PESO%

Source	DF	SS	MS	F	P
MADERA	2	1632.71	816.36	79.29	0.000
HONGO	2	4.25	2.12	0.21	0.820
TRATA.	3	9921.32	3307.11	21.20	0.000
INCUB.	3	1339.08	446.36	43.35	0.000
MADERA*HONGO	4	811.70	202.92	19.71	0.000
MADERA*TRATA.	6	4885.69	814.28	79.09	0.000
MADERA*INCUB.	6	616.15	102.69	9.97	0.000
HONGO*TRATA	6	13.01	2.17	0.21	0.973
HONGO*INCUB.	6	17.21	2.87	0.28	0.947
MADERA*HONGO*TRATA.	12	2437.91	203.16	19.73	0.000
MADERA*HONGO*INCUB.	12	495.37	41.28	4.01	0.000
TRATA.*INCUB.	9	4008.29	445.37	43.26	0.000
Error	360	3706.63	10.30		
Total	431	29889.32			

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

MTB > Oneway 'P. PESO%' 'TRATA.';
 SUBC> Tukey 5.
 One-Way Analysis of Variance

Analysis of Variance on P. PESO%

Source	DF	SS	MS	F	p
TRATA.	3	9921.3	3307.1	70.89	0.000
Error	428	19968.0	46.7		
Total	431	29889.3			

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev	
0	108	11.089	13.661	(---*--)
5	108	0.023	0.010	(--*--)
10	108	0.023	0.011	(--*--)
15	108	0.019	0.009	(--*--)

Pooled StDev = 6.830

0.0 4.0 8.0 12.0

Tukey's pairwise comparisons

Family error rate = 0.0500

Individual error rate = 0.0105

Critical value = 3.63

Intervals for (column level mean) - (row level mean)

	0	5	10
5	8.680 13.452		
10	8.680 2.386	-2.385	
15	8.684 13.456	-2.382 2.390	-2.382 2.389

MTB > Oneway 'P. PESO%' 'MADERA';
 SUBC> Tukey 5.
 One-Way Analysis of Variance

Analysis of Variance on P. PESO%

Source	DF	SS	MS	F	p
MADERA	2	1632.7	816.4	12.39	0.000
Error	429	28256.6	65.9		
Total	431	29889.3			

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
 (CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev	
1	144	3.142	8.624	(-----*-----)
2	144	4.973	11.090	(-----*-----)
3	144	0.251	0.476	(-----*-----)

Pooled StDev = 8.116

0.0 2.0 4.0 6.0

Tukey's pairwise comparisons

Family error rate = 0.0500

Individual error rate = 0.0195

Critical value = 3.31

Intervals for (column level mean) - (row level mean)

	1	2
2	-4.070 0.407	
3	0.652 5.129	2.484 6.961

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Anexo 3. Descripción de las maderas de pino caribe, drago y curarire

3.1. Descripción de la madera de pino caribe extraído de Wangaard et al. (1955).

PINO CARIBE

FAMILIA: Pinaceae

Género: *Pinus* (Mor.)

Especie: *caribaea* var. *hondurensis* (Barr. y Golf.)

El pino caribe se encuentra distribuido naturalmente en las Isla Bahamas, Cuba, Islas de Pinos, Honduras y Nicaragua. Esta especie crece generalmente sobre colinas y montañas. Los árboles a menudo se desarrollan hasta 30 mts de altura, con diámetros de 76 a 110 cm. El duramen es generalmente de color marrón dorado, en algunos especímenes marrón rojizo. Albura de 2,5 a 5 cm de ancho de color amarillo. Anillos de crecimientos distintivos y bruscamente demarcados, aparentemente producidos durante la estación seca, aunque los incendios periódicos y frecuentes pueden ser los responsables en algunas áreas de producir estos múltiples anillos. La madera tardía es de color marrón dorado, mientras que la madera temprana es de apariencia amarillenta. Textura media pero la madera temprana es más gruesa que la madera tardía. Madera rugosa a muy rugosa, debido probablemente a los altos contenidos de resinas. Olor fuertemente resinoso. La madera muestra lustre medio. El peso específico basado sobre el peso seco al horno y volumen verde es 0,68 (0,58 - 0,76). El peso de la madera es de 913 k/m³ cuyo verde y de 817 k/m³ cuyo seca al aire. La madera tiende a secarse lentamente con una marcada tendencia a agrietarse en los tablones y la albura a ser atacada por hongos manchadores.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

3.2. Descripción de la madera de drago extraído de Hess et al. (1950).

DRAGO

FAMILIA: Papilionaceae

Género: *Pterocarpus*

Especie: *acapulcensis* Rose.

El árbol de sangre drago es común en los bosques que se han desarrollado sobre tierras agrícolas abandonadas. Son árboles grandes y corpulentos con copas muy extendidas, con diámetros hasta de 90 cm y alturas hasta de 27 m y de corteza gris a gris amarillento. El duramen es ligeramente de color bronce en condición verde (recién cortado), cambiando posteriormente a marrón amarillento a amarillo claro. Las bandas de parénquima sobre la superficie tangencial forman indistintivos patrones en forma de plumas. Madera con lustre moderado, textura media a gruesa, grano recto a ligeramente entrecruzado en capas estrechas. Olor y sabor ausentes o imperceptibles. Peso específico promedio de 0,57 (0,48 - 0,62) basado sobre el peso seco al horno y volumen verde. Madera pesada, de 930 k/m³ en condición verde y 688 k/m³ en condición seca al aire. Es moderadamente difícil de secar, cuyo se seca al aire ocurre una rápida tasa a moderada cantidad de arqueaduras, pero no presentándose otro tipo de alabeo.

3.3. Descripción de la madera de curarire extraído de Wangaard et al. (1954).

CURARIRE

FAMILIA: Bignoniaceae

Especie: *Tabebuia* (Vahl)

Género: *serratifolia* Nichols.

La madera se desarrolla naturalmente en México, América Central, Colombia, Bolivia, Perú, Paraguay, Brasil y Venezuela. Árbol decídúo, de altura media en muchas áreas, el cual puede desarrollarse en árboles más altos en las colinas de la amazonía, con fustes hasta

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

de 76 cm de diámetros, usualmente rectos y con aletones. El duramen de la madera recién cortada es de color verde amarillento y la albura de color crema de 4 a 9 cm de ancho. El duramen seco es ligeramente marrón oliva oscuro, a menudo con vetas más claras o más oscuras. Grano recto a muy irregular. Anillos de crecimientos definidos por estrechas zonas oscuras de poros numerosos. Peso específico basados sobre el peso seco al horno y volumen verde 0,92 en promedio (0,86 - 0,96). Peso promedio de 1200 k/m³ en condición verde y 1100 k/m³ en condición seca al aire. La madera de curarire exhibe una rápida tasa de secado durante el secado al aire, a pesar de su alta densidad la madera es generalmente fácil de secar.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Anexo 4. Características generales sobre *G. trabeum*, *T. versicolor* y *P. sanguineus*.

4.1. Características generales de *Gloeophyllum trabeum* (Extraído de Gilbertson y Ryvarden, 1986).

***Gloeophyllum trabeum* (Fr.) Murr.**

Basidiocarpo: Anual o perenne, piliado, sésil, imbricado, con varias formas de fructificación, desde comúnmente basal hasta elongados a lo largo de grietas en la madera, frecuentemente efusado lateralmente, hasta 3 cm de ancho, 8 cm de largo, raramente más de 8 mm de espesor en la base, coriáceo y duro. Superficie de color sepia a marrón arcilloso, grisáceo en los más viejos, ligeramente mayor en especímenes en crecimiento, débilmente zonado a azonado, en principio velutinado a tomentoso, después más o menos glabroso a liso, o con protuberancias escruposas muy pequeñas, raramente hispido y con basto largo. Himenóforo irregular, semi lamelado a laberintoide o en cierto modo poroso, con paredes delgadas, 2-4 por mm (en especies lameladas hasta 4 lamelas por mm a lo largo del margen), de color ocre a marrón arcilloso, tubos o lamelas hasta 4 mm de profundidad, en la mayoría de los casos del mismo color del himenóforo. Contexto de color sepia a marrón arcilloso, más denso hacia los tubos, pero sin delimitación distintiva hacia la parte más blanda y algodonosa del contexto.

Sistema hifal: Dimítico (trimítico), hifas generativas con fibulas, hialinas, 2-5 µm de ancho, un poco más anchas en el subhimenio que en contexto, hifas esqueléticas dominando el cuerpo fructífero de color marrón-dorado, paredes gruesas, sin ramas laterales, hasta 6 µm de ancho.

Cistidias: De paredes delgadas, y mayormente embebidas en el himenio, fusoides a ligeramente clavadas, de obtusas a cónicas con un final agudo, algunas con excreciones resinosas como pequeños glóbulos, hialinas a ligeramente amarillo-dorado, hasta 30 µm de longitud y 4 – 5.5 µm de ancho.

Basidias: clavadas, con 4 esterigmas, 20 – 25 x 6 - 7 µm, con fibula basal.

Basidiosporas: Cilíndricas, de paredes delgadas, lisas, hialinas, IKI -, 6.5– 9.9 x 3 – 4.5 µm.

Licencia Creative Commons:

Sexualidad: Heterotálica y bipolar.

Sustrato: Comúnmente sobre muchos tipos de árboles decíduos, pero también sobre coníferas, especialmente en maderas estructurales.

Distribución: Ampliamente distribuido en Norte América, desde el sur de Canadá, en el este y en los trópicos. Especie cosmopolita.

4.2. Características generales de *Trametes versicolor* (Extraído de Gilbertson y Ryvarden, 1987).

Trametes versicolor (L. : Fr.) Murr.

Badiocarpo: Anual, sésil o efuso reflexado, dimidiado, a menudo en amplios racimos imbricados, superficie hirsuta a tomentosa, generalmente de color marrón contrastado con zonas concéntricas de varios colores, amarillo ligero, marrón rojizo o azulado, superficie porosa de color crema, poros angulares a circulares, 4 – 5 por mm, disepimentos gruesos, contexto color crema, fuertemente fibroso, con una fina capa de color negro debajo de la superficie tomentosa, hasta 5 mm de espesor, capa de tubos del mismo color y continua con el contexto, hasta 3 mm de espesor.

Sistema hifal: Trimítico, hifas generativas del contexto de paredes delgadas, con fibulas, de 2.5 – 3 μm de diámetro, hifas esqueléticas del contexto de paredes gruesas, no septadas, de 4 – 6 μm de diámetro, hifas conectivas del contexto de paredes gruesas, no septadas, muy ramificadas, de 2 – 4 μm de diámetro. Hifas tramales similares.

Cistidias: Ausentes.

Basidias: Clavadas, con 4 esterigmas, 15 – 20 x 4 – 5 μm con fibula basal.

Basidiosporas: Cilíndricas, ligeramente curvadas, hialinas, lisas, IKI -, 5 – 6 x 1.5 – 2 μm .

Sexualidad: Heterotálico y tetrapolar.

Sustrato: Sobre madera muerta de numerosos géneros de latifoliadas, ocasionalmente sobre coníferas.

Distribución: En todas las regiones boscosas de Norte América. Especie circumglobal.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

4.3. Características generales de *Pycnoporus sanguineus* (Extraído de Gilbertson y Ryvarden, 1987).

Pycnoporus sanguineus (L.: Fr.) Murr.

Basidiocarpo: Anual, de sésil a efuso reflexado, simples o en racimos imbricados, delgados y aplanados, de 8 x 5.5 x 0.3 cm. Superficie pileal naranja-rojizo, color persistente desapareciendo gradualmente en especímenes más viejos, tomentosa en los márgenes en crecimiento, volviéndose escruposa a glabrosa en las partes más viejas, azonado, superficie porosa de color rojo intenso, poros circulares, 5 – 6 por mm, con disepimientos gruesos. Contexto fibroso, de color amarillo-naranja, y azonado en algunos especímenes, fuertemente azonado concéntricamente en otros, con zonas alternas de amarillo y naranja pálido, hasta 3 mm de espesor, naranja-rojizo hasta 2 mm de espesor.

Sistema hifal: Trimítico, hifas del contexto de paredes gruesas, hialinas, no septadas, algunas veces ramificadas, 2 – 7 μm de diámetro, hifas conectivas del contexto de paredes gruesas, no septadas, muy ramificadas, 2 – 4 μm de diámetro, hifas generativas del contexto de paredes delgadas, hialinas, frecuentemente con fibulas, raramente ramificadas, de 2.5 – 4 μm de diámetro. Hifas tramales similares, hifas conectivas de la trama más conspicuas, generalmente de 1.5 – 2.5 μm , contenido hifal en algunas áreas de los tejidos de la trama fuertemente dextrinoides en reactivo de Melzer.

Cistidias: Ausentes, hifas pegs presentes y usualmente conspicuas.

Basidias: Clavadas, con 4 esterigmas, 11 – 16 x 5 – 6 μm , con fibula basal.

Basidiosporas: Cilíndricas, ligeramente curvadas, hialinas, lisas, negativas en reactivo de Melzer, 5 – 6 x 2 – 2.5 μm .

Sexualidad: Heterotálica y tetrapolar.

Sustrato: Sobre madera muestra de numerosos géneros de latifoliadas.

Distribución: Por todo el sureste de Estados Unidos, ampliamente distribuido por todas las regiones tropicales y subtropicales del mundo.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

GLOSARIO

Agar: Solución nutritiva gelatinosa producida por disolución (usualmente 1 % m/v) en agua caliente o en una solución apropiada de nutrientes, de un extracto de pared celular de ciertas algas rojas. El agar es comúnmente utilizado como medio de cultivo.

Agujero de penetración (bore hole): Orificio dejado en la pared celular cuyo las hifas de un hongo pasa directamente a través de ésta por acción enzimática. La presencia de estos agujeros es evidencia de pudrición avanzada.

Autólisis: Disolución o desintegración de células o tejidos por la acción de fermentos existentes dentro de ellos mismos, sinónimo de autodigestión.

Basidia: Estructura que lleva sobre su superficie un determinado número de basidiosporas (típicamente 4), las cuales generalmente se forman como resultado de cariogamia y meiosis.

Basidiocarpo: Cuerpo fructífero de los Basidiomycetes, los cuales llevan basidias.

Basidiomycetes: Grupo de hongos superiores que se caracterizan por producir sus basiosporas sobre basidias. A este grupo pertenecen la mayoría de hongos que deterioran la madera.

Cápsulas de Petri: Recipiente de vidrio o plástico, constituido por una fuente circulatoria chata con dos lados verticales, y una tapa similar pero algo más gnye que la cubre. Recipiente propio del equipo habitual necesario para obtener cultivos puros de microorganismos en laboratorio.

Cavidad: Formaciones parecidas a tubos que toman lugar en la pared celular como resultado el ataque de microorganismos.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - 80 Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

CCA: Preservante hidrosoluble en cuya composición se encuentra un elemento fungicida como el cobre, uno insecticida como el arsénico y un elemento fijador como el cromo.

Cepa: Variedad genérica de un hongo, obtenida por aislamiento natural o como resultado de mutación o recombinación en laboratorio.

Colapso: Disminución en el tamaño de las células y espesor de las paredes producidas en estados avanzados de pudrición marrón.

Enzima: Proteínas que causan el rompimiento de sustancias complejas hacia unidades más pequeñas, actuando como catalizador en los procesos de metabolismo. Las enzimas de los hongos son segregadas por el micelio para la digestión de sustancias alimenticias.

Erosión: Daño ocasionado en la pared celular como resultado del ataque enzimático de hongos y bacterias.

Fíbula (clamp connection): Conexión hifal en forma de puente o gancho, característica del micelio secundario de la mayoría de los Basidiomycetes, la cual es producida con la finalidad de mantener la condición dicariótica del micelio.

Fructificación: Cualquier estructura fúngica que lleva o contiene esporas.

Hifa: Unidad estructural del micelio de los hongos, filamento tubular.

Hongo: Organismo talófito, aclorófito cuya característica somática es generalmente filamentosa y ramificada. Los hongos poseen paredes celulares y núcleos y se reproducen típicamente tanto de manera sexual como asexual.

Incubación: Período de tiempo en el cual se proporcionan las condiciones necesarias para el desarrollo de los hongos.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Inoculo: Material fungal transferido a cápsula o tubo con agar para cultivarlo.

Lumen: cavidad interna de una célula xilemática.

Manchado: Cambios en el color normal de la madera que resulta del crecimiento de hongos dentro de la madera o cambios químicos en las células o en sus contenidos.

Micelio: Masa de hifas que constituye el cuerpo (talo) de los hongos.

Micelio algodonoso: Tipo de micelio bastante largo, en el cual las hifas se presentan de manera individual y extendiéndose en todas direcciones. Micelio ligeramente levantado sobre la superficie del agar.

Micelio ausente: Micelio solo sumergido, la superficie del agar puede ser lisa o en forma de gamuza.

Micelio harinoso: Micelio cubierto con minúsculos granos.

Micelio lanoso: Tipo de micelio en el cual las hifas o grupo de hifas se presentan bastante largas y entretejidas, un poco enmarañado, parecido a la ropa de lana.

Microbiología de maderas: Incluye el estudio de todos los microorganismos que atacan y deterioran la madera.

Micrón: Unidad de medida equivalente a 1/1000 mm, representada por el símbolo μm .

Permeabilidad: Facilidad por la cual la madera puede absorber líquidos o gases.

Preservación: Técnica por la cual se introducen sustancias preservantes dentro de la madera.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Preservante: Tipos de compuestos químicos que se introducen en la madera para protegerla contra los agentes de deterioro.

Pudrición: Cambio en las propiedades químicas y físicas de la madera, causada principalmente por la acción enzimática de microorganismos.

Pudrición avanzada: Estado final de la degradación de la madera por hongos, donde todas las características y propiedades de la madera han cambiado, pudiéndose notar estructuras como bolsillos, hilos, cubos y cambios de color.

Pudrición blanca: Pudrición de la madera causada por hongos, en la cual prácticamente todos los componentes químicos de la madera son degradados.

Pudrición blanda: Pudrición de la madera casada por hongos, la cual se caracteriza por la formación de cavidades en la pared celular, dejando blanda la madera e incrementando la retención de humedad dentro de ésta.

Pudrición incipiente: Estado inicial de la degradación de la madera por hongos, donde no ha ocurrido gran pérdida de las propiedades y donde puede ser notado un ligero cambio de color.

Pudrición marrón: Pudrición de la madera causada por hongos, en la cual solamente la celulosa es degradada, dejando la lignina químicamente modificada.

Punteaduras: Aberturas naturales de la madera, las cuales unen las cavidades celulares de células adyacentes.

Refractaria: En preservación de maderas, especie que es difícil tratar con preservantes.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Rizomorfos: Agregación de hifas en forma de raíces u órgano linear, que forma el micelio de algunos hongos con la finalidad de translocar agua y nutrientes a largas distancias.

Saprobio: Organismo que utiliza como alimento materia orgánica muerta.

Síntomas: Manifestaciones que se presentan en la madera como resultado del ataque de agentes de deterioro.

Sustrato: Material orgánico muerto que sirve como alimento a organismos vivos.

Susceptibilidad: Condición intrínseca de la madera que la hace vulnerable al ataque. Los grados de susceptibilidad dependen de la especie, la variedad o el individuo.

Xilófago: Organismo que se alimenta de madera.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE