

**BIOALTERACIÓN,
PROTECCIÓN
Y CONSERVACIÓN
DE MADERAS**

BIOALTERACIÓN, PROTECCIÓN Y CONSERVACIÓN DE MADERAS.
Vilma G. Rosato, Luis P. Traversa. - 1a ed . - La Plata : Laboratorio de Entrenamiento
Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica - LEMIT, 2017.

100 p. ; 30 x 21 cm.

ISBN 978-987-3838-08-8

1. Madera . 2. Conservación. 3. Restauracion en Madera. Vilma G. Rosato, Luis P. Traversa
III. Título
CDD 720.1

Título:

BIOALTERACIÓN, PROTECCIÓN Y CONSERVACIÓN DE MADERAS

Editor:

Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica

Diseño y diagramación:

Maria Laura Motta

Diseño, Fotografía e ilustraciones:

Sebastian Marquez

Cantidad de ejemplares: 100

Esta publicación es patrocinada por la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires a través de un Subsidio para Publicaciones Científicas y Tecnológicas (PCT09).



Todos los derechos reservados.

Ninguna parte de esta publicación puede ser reproducida por algún método gráfico, electrónico o mecánico, incluyendo los sistemas de fotocopias, registro magnetofónico o de alimentación de datos, sin expreso consentimiento del editor.

All rights reserved.

No part of this publication may be reproduced by any method graphic, electronic or mechanical, including photocopying systems, magnetic recording or record data feed, without written permission from the publisher.

INDICE

INTRODUCCIÓN	7
CARACTERÍSTICAS DE LA MADERA	9
LA MADERA COMO ELEMENTO ESTRUCTURAL	21
PROTECCIÓN DE LA MADERA CONTRA AGENTES BIÓTICOS Y ABIÓTICOS	31
BIODETERIORO CAUSADO POR INSECTOS EN MADERAS	45
DURABILIDAD DE LAS MADERAS	57
ACCIÓN DEL BIOFOULING SOBRE MADERAS SUMERGIDAS	65
DURABILIDAD DE MADERAS: IMPACTO DE LOS HONGOS EN EL PROCESO Y SUS DAÑOS	75

ACCIÓN DEL BIOFOULING SOBRE MADERAS SUMERGIDAS

M. Pérez^{1,2}, E. Gámez¹, A. Paola^{1,2}, G. Blustein^{1,3}

El biofouling (o incrustaciones biológicas) se define como la acumulación de micro y macroorganismos sobre cualquier sustrato sumergido. Algunas de las numerosas especies que pueblan los mares y las aguas continentales son llevadas por las corrientes y deben encontrar una superficie dura para fijarse con el propósito de completar sus ciclos de vida. La escasez de sustratos duros naturales trae como consecuencia que cada espacio disponible sea disputado y cubierto por una variedad de organismos que buscan los sustratos tanto para su asentamiento como para alimento y refugio.

Dado que el biofouling es un proceso natural, afecta tanto a sustratos naturales como a estructuras que fueron sumergidas con alguna finalidad, como por ejemplo, boyas, pilotes, cables, cascos de embarcaciones, plataformas off-shore, cañerías, etc.

Esta comunidad se desarrolla y crece ocasionando graves pérdidas económicas como consecuencia de su fijación y el deterioro de los materiales. La fijación de la comunidad incrustante modifica la hidrodinámica de las embarcaciones generando un aumento en el consumo de combustible en los barcos, desestabiliza estructuras oceánicas sumergidas (por ejemplo, plataformas de extracción de gas y petróleo) como consecuencia del aumento del peso, puede disminuir drásticamente el intercambio de calor en torres de enfriamiento, bloquear tuberías e impedir la apertura y cierre de compuertas en centrales hidroeléctricas (Yebra et al., 2004).

Las características de la comunidad resultante, el espesor de la incrustación y el grado de biodeterioro dependen de diversos factores, fundamentalmente la naturaleza del sustrato (metal, madera, plástico, vidrio), la disponibilidad y diversidad de los colonizadores, la eficiencia de su fijación y los eventos bióticos/abióticos que ocurren durante y después de la fijación.

La fase larval es un importante factor de dispersión para los organismos bentónicos con una fase adulta sésil y se encuentra afectada por factores tales como

la duración de la fase nadadora, el comportamiento y la plasticidad fisiológica, todos ellos necesarios para adaptarse a cambios del entorno como temperatura del agua y variaciones en el pH (Scheltema, 1986, Wares et al., 2001). Los organismos adultos tienen potencialmente la capacidad de “navegar” grandes distancias adheridos a sustratos naturales u objetos artificiales tales como cascos de barcos comerciales y/o recreacionales o en el agua de balasto. Estos mecanismos adicionales de dispersión y migración favorecen a su vez la transferencia de especies invasoras (Sheets et al., 2016).

La descomposición biológica en maderas saturadas de agua se observa en embarcaciones de madera en servicio, barcasas, barcos hundidos, maderas enterradas y anegadas, troncos almacenados después de la cosecha de árboles o bajo rocíos constantes de agua, madera en pilotes de cimentación, postes de señalización, madera en muros de contención expuestos a humedad constante, muelles, pilotes, torres de enfriamiento y granjas para acuicultura, entre otros.

- La madera como material de construcción

Entre los materiales de construcción históricamente más empleados se encuentra la madera, utilizada para la fabricación de embarcaciones, pilotes, muelles y postes.

La madera tiene una serie de ventajas que la convierten en un material competitivo para estructuras frente al mar y el agua dulce aunque su utilización a menudo se encuentra limitada debido al deterioro producido por organismos que afectan tanto su integridad como su durabilidad. Es un material preferido sobre otros en función de su disponibilidad, buena resistencia específica, bajo costo y fácil manejo.

Desde la antigüedad, los usos de la madera mojada o sumergida fueron muy diversos. Los egipcios empapaban madera seca hasta convertirla en húmeda como método para extraer trozos enormes de roca granítica para sus obeliscos. Los vikingos

¹ Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnología de Pinturas (CIDEPINT)

² Facultad de Ciencias Naturales y Museo (UNLP)

³ Facultad de Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales (UNLP)

quemaban la parte externa de sus naves de madera para hacerlas resistentes al agua y al deterioro por organismos sin conocer que en realidad estaban proporcionando hidrofobicidad. Son numerosos los restos arqueológicos sumergidos que se encuentran en riesgo por el ataque de distintos organismos perforantes. De las historias de naufragios, se sabe que los antiguos egipcios y chinos usaron revestimientos protectores como resinas, brea o pintura para el casco de sus barcos, además de retirarlos del agua y secarlos en la playa (Steinmayer & Turfa, 1997). Estos métodos en cierta manera resultaron efectivos, aunque con el inicio de los viajes de exploración en el siglo XV utilizando grandes barcos de madera se presentaron nuevos desafíos. En reportes de la época se afirma que las carabelas de Colón se protegieron con sebo y alquitrán en tanto que las embarcaciones de Vasco da Gama con carbón. La actividad destructiva de los organismos taladradores de madera fue un gran obstáculo para los navegantes y se transformó en un problema de estado cuando hacia 1730 los Países Bajos se vieron amenazados por una inundación masiva como producto de la enorme destrucción causada en los diques. Esta perspectiva generó un enorme interés en el estudio y control de los organismos perforadores de madera.

Si bien actualmente la madera no es el material más empleado para la fabricación de embarcaciones, en ciertas regiones del mundo como Turquía sobre las costas del Mar Negro, en Italia y en el sudeste asiático aún se continúa utilizando (Singh & Sasekumar, 1996, Sivrikaya et al., 2012, Palanti et al., 2015).

• Biodeterioro de la madera

Dado que las estructuras sumergidas tanto en las costas marítimas como fluviales fabricadas en madera se encuentran expuestas al deterioro producido por micro y/o macroorganismos, es imprescindible su identificación y conocer el rol que cumplen en los procesos de biodeterioro a fin de implementar metodologías efectivas para su control.

Las bacterias son los primeros microorganismos que colonizan la madera expuesta en ambientes húmedos, han sido encontradas en maderas sumergidas en agua salada y dulce y en contacto con el suelo. Otros organismos que degradan la madera son los hongos de pudrición blanda, que pueden tolerar un rango amplio de condiciones de temperatura, humedad y pH. Si bien hongos y bacterias deterioran la madera, particularmente los hongos basidiomicetos son considerados los más agresivos. Las bacterias son en general aún más tolerantes que los hongos a condiciones extremas o desfavorables, como por ejemplo, a altos contenidos de lignina, alta carga de preservantes y bajos niveles de oxígeno (Singh & Butcher, 1991). En los casos en que las células de la madera están saturadas de agua, la disminución

en la concentración de oxígeno actúa como factor limitante de la actividad de los microorganismos e influye en la velocidad de degradación.

Entre los macroorganismos que intervienen en el biodeterioro de la madera se encuentran aquellos que la utilizan como sustrato para completar sus ciclos de vida adhiriéndose a la superficie y aquellos que ingresan en su interior causando daños físicos rápidos. Estos últimos son los organismos perforadores que afectan seriamente la integridad estructural de instalaciones costeras convirtiendo pilares sólidos, muelles, marinas y embarcaciones en estructuras débiles y frágiles (Rao et al., 2011).

La comunidad intertidal de organismos que atacan la madera está compuesta por un grupo heterogéneo de representantes que incluyen principalmente bacterias, hongos, bivalvos (Fam. Teredinidae y Pholadidae) y crustáceos de los órdenes Isopoda (Fam. Limnoriidae y Sphaeromatidae) y Anfípoda (Fam. Cheluridae). Estos organismos utilizan la madera no sólo para refugiarse sino también como fuente de alimento, su desarrollo y crecimiento depende de distintos factores abióticos como la concentración de oxígeno, la temperatura del agua y la salinidad.

Seguidamente se detallarán las características más importantes de la colonización y consecuente biodeterioro que causan los distintos organismos en maderas sumergidas y los principales mecanismos que intervienen en la degradación.

• Bacterias

Durante mucho tiempo se consideró que los hongos eran los principales agentes de biodegradación de la madera. Sin embargo, dependiendo de la etapa de degradación y condiciones ambientales, se demostró que las bacterias cumplen también un rol fundamental. En este sentido, funcionan como colonizadores primarios favoreciendo la sucesión microbiana que conduce al deterioro pudiendo actuar de forma sinérgica con otros organismos (Soo Kim & Singh 2000, Berrocal Jiménez, 2007).

La causa biológica del deterioro es la sucesión, es decir, la formación del biofouling, en el que las bacterias que colonizan el sustrato inician la degradación modificando las condiciones para la llegada de microorganismos más complejos. Una evidencia de este mecanismo es la degradación de la pared celular y la presencia de células bacterianas muertas que proporcionan la fuente de nitrógeno (de baja concentración en la madera) que funciona como importante nutriente fúngico.

El análisis de los patrones de descomposición de la madera sumergida resulta complejo, dependiendo tanto de las variables ecológicas y biogeográficas

como de características fisicoquímicas del sustrato (tipo de madera, volumen, dureza, degradación exterior e interior, pH, potencial redox, concentración de iones específicos, oxígeno) (Jordan, 2001).

Las bacterias deterioran la madera degradando la pared celular. Asimismo, degradan la membrana de las punteaduras (lo cual provoca un aumento de la permeabilidad) o bien atacan los preservantes, incrementando la susceptibilidad a organismos perjudiciales. En general, sus enzimas degradan la celulosa transformándola sucesivamente en celobiosa, hidrógeno, metano, anhídrido carbónico y ácidos grasos dependiendo la velocidad y grado de degradación de las condiciones de exposición y conservantes presentes en la madera.

De acuerdo al tipo de deterioro, las bacterias pueden agruparse en cuatro categorías principales. 1. Aquellas que afectan la permeabilidad de la madera sin alterar significativamente las propiedades mecánicas. 2. Las que atacan la pared celular afectando las propiedades de resistencia. 3. Las que constituyen la microbiota total contribuyendo a la descomposición definitiva de la madera. 4. Las bacterias colonizadoras “pasivas” que aún sin tener efecto sobre la madera, actúan como antagonistas sobre las poblaciones que naturalmente habitan allí.

Desde el punto de vista estructural, se reconocen tres formas de descomposición bacteriana: por erosión, tunelización y cavitación (Soo Kim & Singh, 2000). La erosión bacteriana se produce sobre la cara expuesta de las paredes celulares de la madera y se considera de tipo “estriada” cuando desde el lumen de las células degradan la pared produciendo canales paralelos a los microfibrillas de celulosa. Los canales pueden ser superficiales en la laminilla terciaria (ataque por bacilos) o formar depresiones profundas que progresan desde el lumen a la pared celular secundaria (ataque por cocos). Ambos tipos de erosión pueden ser simultáneos. La erosión “cónica” es de difícil detección dado que las bacterias degradan la madera formando canales de erosión en forma de “V” invertida que se amplían dando como resultado su coalescencia. En general, la erosión bacteriana se distingue de la descomposición fúngica por la presencia de residuos de lignina (Singh et al., 1990).

El túnel bacteriano es un patrón inusual de descomposición. La degradación se produce en el interior de las paredes celulares produciendo túneles que crecen en distintas direcciones presentando un aspecto sinuoso. En este caso, se metabolizan todos los componentes de la pared celular, incluida la lignina (Soo Kim & Singh, 2000).

La cavitación bacteriana es menos conocida, se focaliza dentro de las paredes celulares de la

madera, formando cavidades perpendiculares al eje longitudinal de las células, que crecen en forma de diamante y luego convergen resultando en formas variadas. Esta degradación se extiende hacia grandes áreas de la pared celular alrededor de las colonias bacterianas, en forma similar a la pudrición marrón de la madera producida por hongos.

Cuando la madera está saturada de agua es colonizada por bacterias que atacan y destruyen los componentes no lignificados en alrededor de quince días, varios meses después ocurre el ataque por bacterias degradantes de lignina. Bajo estas condiciones las bacterias y los hongos de pudrición blanda desempeñan un papel importante produciendo una degradación lenta, lo que ha favorecido la conservación de bosques arqueológicos recuperados de aguas o sedimentos oceánicos que habían estado expuestos durante cientos o miles de años.

Muestras muy antiguas de madera de construcción de distinta procedencia, tales como estacas, tableros de pisos, tablones y madera anegada de naufragios, demuestran una erosión bacteriana generalizada, con algunos ataques de bacterias de túnel y hongos de pudrición blanda que forman cavidades. Recientemente se han desarrollado estudios sobre maderas sumergidas a grandes profundidades en el Mar Mediterráneo que revelaron una alta diversidad de bacterias fermentadoras y microorganismos involucrados en el ciclo del azufre y en la producción de metano (Fagervold et al., 2014).

En ambientes dulciacuícolas, los hongos son más relevantes que las bacterias en la degradación de madera sumergida. En estos casos se demostró que la lixiviación de compuestos orgánicos solubles y la fragmentación, es decir la ruptura por factores bióticos o abióticos, cumplen una función importante en la degradación y que la diversidad bacteriana aumenta a lo largo de la descomposición (Jones et al., 2019).

• Hongos

Los hongos son organismos eucariotas con nutrición heterótrofa absorptiva, pared celular compuesta por quitina, reproducción sexual o asexual mediante esporas y cuerpo unicelular o filamentoso (Alexopoulos, 1979). Estos organismos debido a su plasticidad ecológica presentan una distribución cosmopolita que abarca tanto el medio terrestre como el acuático.

La existencia de hongos acuáticos se conoce desde el siglo XIX, pero fue a partir de mediados del siglo XX que comienzan a estudiarse en profundidad (Enríquez et al., 2003). En los últimos treinta años se han incrementado las investigaciones sobre la taxonomía, diversidad, distribución, ecología y

biotecnología de los hongos lignícolas (Kane et al., 2002, Sudheep & Sridhar, 2011). Sin embargo, son pocos los estudios sobre aspectos fisiológicos realizados en este grupo y han sido dirigidos hacia determinadas especies.

Los hongos tienen gran importancia en el ambiente acuático por sus funciones en la degradación de materia orgánica y de compuestos que no pueden ser utilizados por otros organismos como la celulosa y la lignina, cuya acumulación podría convertirse en una causa de contaminación en los ecosistemas marinos y de agua dulce (Hyde et al., 2016). Por tanto, contribuyen al reciclaje de nutrientes, a la mineralización de las fuentes de carbono absorbidas de sus alrededores y al movimiento de materia y energía en su medio circundante (Agrawal et al., 2018). De esta manera, hongos que degraden madera o la usen como sustrato son considerados como lignícolas. Ciertos hongos ascomicetos y deuteromicetos asociados generalmente con bacterias causan la pudrición blanda de la madera. Los hongos de pudrición blanda en la madera de gimnospermas dan lugar a la formación de cavidades orientadas paralelamente a los microfibrillas de celulosa en tanto que en las angiospermas se caracterizan por erosionar la pared celular.

En la costa marítima y en lagunas de la provincia de Buenos Aires se encuentran diversas estructuras de madera que pueden estar parcial o totalmente sumergidas. Consecuentemente, la micobiota acuática lignícola potencialmente contribuye al biodeterioro de estas estructuras de madera, lo que ocasiona daños estéticos al material y pérdidas económicas. La nutrición heterótrofa absorptiva de estos hongos comprende aspectos tales como la secreción de exoenzimas al medio circundante, degradación del sustrato por parte de estas enzimas hasta convertirlos en sus sillares estructurales y la incorporación al interior del cuerpo fúngico. Dentro de la batería enzimática presente en los hongos acuáticos lignolíticos se encuentran exoenzimas con actividad celulítica (celulasas) y ligninolíticas (peroxidasas ligninolíticas) que atacan la celulosa y lignina de la madera, respectivamente (Gutiérrez & Martínez, 1996).

Los hongos marinos filamentosos superiores incluyen 530 especies distribuidos en 321 géneros, pertenecientes al Phylum Ascomycota y Phylum Basidiomycota (Pang et al. 2016). En la provincia de Buenos Aires (Argentina), se reportaron hongos marinos Pyrenomycetes lignícolas en maderas atascadas en la zona del mesolitoral de Mar del Plata (38°00'S, 57°33'O) (Malacalza & Martínez, 1971). En estudios posteriores se amplió la distribución de hongos Ascomycota y se citan por primera vez para América del Sur a *Chadefaudia corallinarum*, *Halosphaeria salina* y *Corollospora marítima*, esta

última especie registrada para San Clemente del Tuyú (36°21'S, 56°43'O) (Kohlmeyer, 1976).

Por otra parte, se realizaron estudios sobre paneles experimentales de madera en la zona intermareal de Mar del Plata cuyos resultados ampliaron la lista de especies de la micobiota lignícola para la región. Asimismo, se confeccionó una clave dicotómica para la identificación de hongos marinos filamentosos en la provincia de Buenos Aires teniendo en cuenta características de los propágulos (Peña et al., 1996, Peña & Arambarri, 1998, Peña, 2000).

Los hongos lignícolas dulciacuícolas son un grupo taxonómicamente muy diverso en su mayoría y pertenecen a las clases Dothideomycetes y Sordariomycetes del Phylum Ascomycota (Li et al., 2018). Los aportes referentes a la presencia de hongos en ambientes dulciacuícolas en la provincia de Buenos Aires se atribuyen a las especies encontradas por primera vez en las lagunas Alsina (36°49'S, 62°13'O), La Blanca y Chis-Chis (35°46'S, 57°57'O) (Steciow, 1998).

• Moluscos

Entre los moluscos perforadores de madera el bivalvo *Teredo* es el más estudiado (Figuras 1-4). Su distribución es amplia ya que habita en mares con temperaturas que oscilan entre 14°C y 20°C, salinidades entre 20 y 30 ppt pero también puede tolerar muy bajas salinidades del orden de 5 ppt, lo que le permite desarrollarse bajo condiciones estuariales (Borges et al., 2014). Si bien su aspecto es vermiforme, es un bivalvo cuya parte anterior está cubierta por dos pequeñas conchillas trilobuladas que utiliza para taladrar la madera, el sistema de perforación se completa con una fuerte apófisis y un pie muscular. Los movimientos laterales imprimidos a las valvas por los músculos aductores provocan la abrasión de la madera y, a medida que va formando las galerías, secreta carbonato de calcio con las que las tapiza en su interior (Figuras 2-4). La cavidad paleal es alargada, acaba en un sifón inhalante y otro exhalante en el extremo posterior del cuerpo y por medio de un par de paletas se eliminan las partículas de madera fuera del tubo. En el estómago se acumula la madera ingerida y allí numerosos amebocitos fagocitan y digieren las partículas leñosas, a su vez la digestión se completa con la intervención de celulasas que degradan la celulosa. Estas enzimas son aportadas por grandes concentraciones de bacterias simbiotas capaces de degradar la celulosa y fijar nitrógeno que conforman la glándula de Deshayes (Quayle, 1992).

Por lo general miden un centímetro de diámetro y alrededor de 20 cm de longitud aunque se han encontrado especímenes de hasta 58 cm (NIMPIS, 2011).

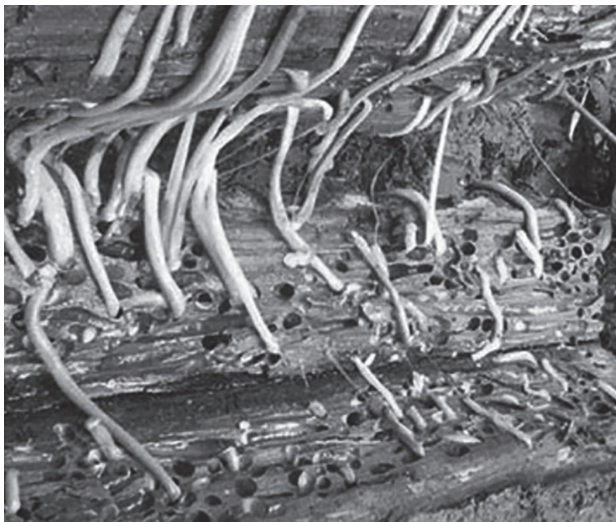


Figura 1. Pilote infestado por Teredo. Fotografía cortesía de Exponav (Fundación Raúl Vila).

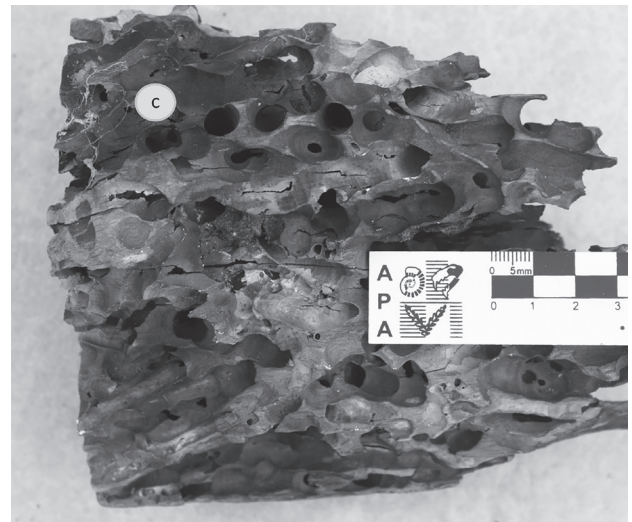


Figura 4. Vista en corte longitudinal del pilote.



Figura 2. Trozo de pilote sumergido en la costa de Patagonia (Argentina), a: zona de ingreso del molusco perforador *Teredo* sp., las flechas indican los orificios de ingreso de las larvas del molusco, b: corte transversal de la madera del pilote.

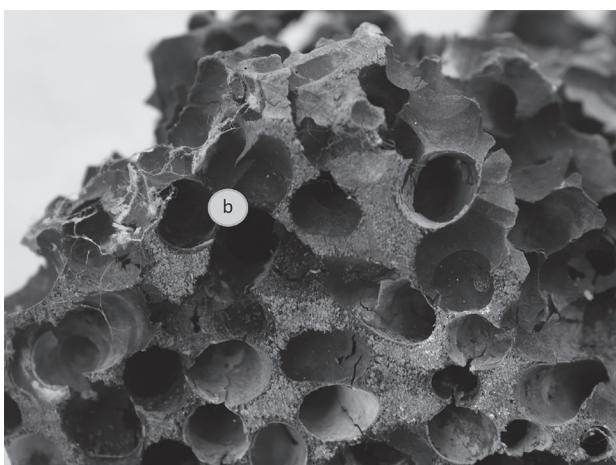


Figura 3. Detalle del corte transversal donde se observan los túneles.

Algunas especies de esta familia pueden producir hasta 100 millones de huevos por desove (Borges, 2014). La larva de *Teredo* es anatómicamente semejante a otras larvas de bivalvo y penetra la madera una vez que ésta se encuentra completamente saturada de agua (Bastida et al., 2002). Las especies de teredínidos presentan una fase larvaria planctónica prolongada que se desarrolla durante 3 a 4 semanas, lo que les permite la dispersión siendo arrastradas por las corrientes o inclusive en el agua de balasto de los barcos.

Una organización similar se encuentra en *Bankia*, otro molusco teredínido perforador de madera que puede alcanzar un largo total que varía entre 38 mm y 610 mm con una tasa de crecimiento entre 10 mm y 74 mm por mes dependiendo de factores abióticos, el grado de infestación y el tipo de madera colonizada (Quayle, 1992). La colonización por parte de este molusco es muy rápida habiéndose reportado la construcción de túneles de 16-18 cm de longitud en apenas 90 días (Shipway, 2013).

La tasa de crecimiento de los túneles del teredínido *Lyrodus pedicellatus* es de 74 mm por mes (Findlay, 2013). Los túneles se construyen gracias a la acción combinada del pie muscular, la parte anterior del céfalo, la presión hidrostática y el movimiento raspador de las valvas (Quayle, 1992). A su vez, se ha sugerido que el túnel avanza siguiendo la disposición de las traqueidas, células que conducen savia bruta y una vez maduras transportan agua, esto ayuda a ablandar la madera manteniendo la presión hidrostática y la limpieza y lubricación de las valvas encargadas del corte. Las traqueidas están alineadas longitudinalmente y la entrada de agua de mar que ingresa cargada de bacterias que degradan celulosa y hongos, facilita el progreso del túnel por ablandamiento de la madera. A su vez, otra característica interesante en la construcción de las galerías es la capacidad de cambio de dirección, que

puede ocurrir al acercarse a la interfaz madera/agua o en las cercanías con otro túnel, en ese caso bloquean el túnel desocupado con un revestimiento calcáreo y continúa el avance (Board, 1970). Una vez instalado en su túnel, el “teredo” queda confinado allí y la dispersión de la especie dependerá de la condición en que se encuentre la madera, esto es, si está flotando libremente o está quieta formando, por ejemplo, parte de alguna estructura. En este último caso la dispersión se llevará a cabo por liberación de sus larvas al plancton.

La industria maderera con la acumulación, almacenaje y transporte de troncos para construcción contribuye a la proliferación de los “teredos”, lo que ubica al efecto antropogénico como uno de los principales factores de diseminación e infestación. Asimismo, los desechos generados por las industrias relacionadas aportan a la propagación de estas especies.

Otro bivalvo perforador es *Xylophaga*, originalmente descrito como teredínido, pero actualmente perteneciente a la familia *Xylophagidae*. Es de destacar la amplia distribución vertical de las especies de este género, dado que se han registrado colonizando maderas sumergidas desde 15 m hasta grandes profundidades mayores a los 7000 m (Voight, 2009, Gaudron et al., 2016).

Dentro de la familia *Pholadidae* *Martesia striata* es una especie dominante en India que causa severos daños a las estructuras de madera. Se caracteriza por su gran resistencia a cambios en la salinidad, a la concentración de oxígeno y su capacidad de soportar prolongados períodos de desecación durante la baja marea (Yennawar et al., 1999).

• Crustáceos

Los crustáceos involucrados en la destrucción de la madera son isópodos de la familia *Limnoriidae* y *Sphaeromatidae* y Anfípodos de la familia *Cheluridae*.

A diferencia de los moluscos que ingresan y atacan la madera internamente, los crustáceos inician su ataque desde el exterior. La acción de crustáceos que destruyen maderas está íntimamente relacionada con la temperatura, la salinidad y la disponibilidad de alimento, y estas condiciones son las que limitan su área distribución alrededor del planeta. Por ejemplo, los limnóridos se distribuyen solamente en aguas templadas a frías (Peñaflares Ramírez, 2008), *Limnoria* y *Chelura* sólo pueden vivir en concentraciones salinas altas y no sobreviven en agua dulce. En contraste, *Sphaeroma* tolera un amplio rango de salinidades, aunque está confinado a temperaturas tropicales y elige aquellas zonas con menor penetración de la luz (Cragg et al., 1999).

Los isópodos son crustáceos aplanados dorso-ventralmente y muy pequeños, rara vez sobrepasan los 5 mm de longitud. *Limnoria* (“gribble”) se dispersa siguiendo señales químicas, fundamentalmente metabolitos de hongos (Cragg et al., 1999). Si bien la penetración de *Limnoria* en la madera nunca supera los 2 cm, los procesos erosivos que se inician producen un deterioro en los pilotes que adquieren un aspecto de “punta de lápiz”. Para ingresar en la madera, *Limnoria* efectúa un movimiento de raspado por la acción masticadora de sus mandíbulas dando forma a su madriguera. Luego se lleva a cabo la degradación de la celulosa, acción que ocurre exclusivamente por acción enzimática en el intestino, esto es, no poseen una microbiota acompañante para realizar esta función (Naylor, 1972). A su vez, se ha demostrado que la hemocianina contribuye notablemente a la digestibilidad por parte de las celulasas, dado que tiene actividad ligninolítica, es portadora de oxígeno y ha sido encontrada en el sitio de la digestión de la madera (Besser, et al., 2018).

Los limnóridos tienen una fecundidad muy baja y el número de huevos fertilizados oscila entre 5 y 30 según las especies. Se mantienen en bolsas de cría durante este período y luego se liberan en las galerías parentales por lo cual se encuentran protegidos de condiciones adversas maximizando la supervivencia. Desde los túneles de los progenitores, excavan sus propios túneles en forma perpendicular, provocando un alto deterioro biológico en la madera infestada.

Se estima que, en el pasado, el principal medio de dispersión de los limnóridos fue probablemente a través de los cascos de los barcos de madera. Actualmente, se considera que es mediante el movimiento de maderas flotantes (Borges, 2014).

Por otra parte, otros isópodos taladradores de madera como *Sphaeroma terebrans*, *Paracerceis caudata*, *Dynamenella* sp. y *Phycolimnoria clarkae*, consumen y dañan las raíces tanto aéreas como sumergidas de los manglares que crecen en las regiones del Atlántico occidental y el Caribe, reduciendo en algunos casos la tasa de crecimiento relativo de la raíz en un 55% (Ellison & Farnsworth, 1990, Baratti et al., 2011).

Los isópodos del género *Sphaeroma* atacan las maderas generando un tipo de deterioro semejante a un panal de abejas. Las heridas causadas por estos crustáceos son la vía de entrada de bacterias y hongos que dan continuidad al proceso de descomposición siendo, a su vez, su fuente de alimento.

Por su parte, los anfípodos de la fam. *Cheluridae* también forman túneles cuyo diámetro oscila alrededor de 6 mm. Por lo general se encuentran en asociación con los limnóridos y cumplen un rol fundamentalmente “reciclador” de la madera ya

que se alimentan de sus propias heces y de las de Limnoria y solo ocasionalmente de la madera en sí (Green Etxabe, 2013).

• Mecanismos involucrados en la biodegradación de la madera

Como se expresara anteriormente, la madera en ambientes húmedos es atacada y degradada tanto por hongos de pudrición blanda como por bacterias (Soo Kim & Singh, 2000). Dado que estos organismos son menos agresivos que los hongos basidiomicetos, la madera en ambientes húmedos puede sobrevivir durante un tiempo relativamente largo. Los patrones de degradación dependen si la madera se encuentra en contacto directo con el agua (es decir, sumergida, anegada o “waterlogged”), o bien si está enterrada en un sedimento marino u oceánico (“buried”).

Los datos disponibles sobre la química de las maderas en ambientes húmedos sugieren que, preferencialmente, primero se degrada la hemicelulosa seguida por la celulosa, la lignina de madera dura y finalmente la lignina de madera blanda. Las características micromorfológicas, como la degradación preferencial de la capa S2, la pérdida de birrefringencia de las paredes celulares de la madera y la presencia de la lámina media relativamente intacta en maderas degradadas y anegadas respaldan los datos químicos.

- Maderas arqueológicas anegadas

Degradación de los polisacáridos

Las maderas arqueológicas anegadas mostraron una mayor cantidad de extractivos con un 1% de extracción alcalina en comparación con la madera reciente. Dado que algunos polisacáridos fácilmente solubles y hasta cierto punto la celulosa degradada se extraen con un 1% de álcali, se asume que la solubilidad alcalina es un buen indicador de la descomposición de la madera por ataques microbianos. La gran cantidad de sustancias extractivas en las maderas arqueológicas anegadas después de la extracción alcalina sugiere pérdidas en los polisacáridos de bajo peso molecular y una proporción de holocelulosa a lignina muy baja. Por ejemplo, se ha informado que gran parte de la fracción de polisacáridos fue eliminada de la parte exterior de los tablones de *Pinus massonia* de veleros chinos (chinese junks) de unos 700 años de antigüedad, mientras que la composición química de la parte interna fue casi similar a la de la madera reciente. Esto también fue válido para otras maderas como *Quercus sp.*, *Bischofia polycarpa* y *Prumnopitys ferruginea*.

Degradación de la lignina

Los estudios ultraestructurales de maderas anegadas también han proporcionado evidencia de cambios en

la lignina. La reducción de la intensidad de la tinción e incluso la descomposición de la laminilla media sugieren estas modificaciones.

La lignina de muestras de madera arqueológica anegada mostró un cambio en las bandas de absorción en los espectros ultravioleta, infrarrojo y de resonancia magnética nuclear. La disminución de unidades de metiloxi y unidades de siringilo en maderas duras antiguas y la eliminación de lignina de tipo siringilo (lignina de madera dura) preferentemente a lignina de tipo vainillilo (lignina de madera blanda) fue reportada en bosques arqueológicos empapados atacados por hongos de pudrición blanda. Estos hallazgos coinciden con los resultados de que la guaiacil-lignina es más estable que la siringil-lignina durante el proceso de envejecimiento.

Degradación de los extractivos

En general, los extractos orgánicos incrustados en la pared celular ayudan a proteger los polímeros de la madera de la hidrólisis enzimática y la biodegradación. La alta durabilidad de los extractivos de madera se comprobó en un estudio sobre alquitranes antiguos, se demostró que la composición del alquitrán en barriles de *Pinus sylvestris* de un naufragio ruso de fines del siglo XVIII era prácticamente la misma que la del material recién preparado. También se ha observado una alta concentración de taninos y compuestos polifenólicos en el parénquima y vasos de maderas arqueológicas anegadas que aparentemente habían sido degradadas por microorganismos.

- Madera arqueológica enterrada

Degradación de los polisacáridos

La composición química de la madera enterrada es notablemente similar a la de las maderas anegadas. Se ha encontrado que la tasa de degradación de celulosa en muestras de madera enterrada muy degradada fue más pronunciada que la de la hemicelulosa. La explicación proporcionada fue que la degradación preferencial de la celulosa en maderas arqueológicas enterradas se debe al ataque microbiano, mientras que las mayores pérdidas en hemicelulosas se producen por hidrólisis no biológica.

Sin embargo, está bien documentado que la degradación de la hemicelulosa es más grave que la de la celulosa en la madera arqueológica. Esta discrepancia puede atribuirse a las condiciones de enterramiento de las maderas, incluida la química de los sitios de enterramiento y a las especies de madera. La extensión de la degradación de la madera no solo se relaciona con la duración del enterramiento, sino también con el medio. Las condiciones ambientales de los sitios de enterramiento como por ejemplo, pH, temperatura y salinidad del agua de mar, son factores

que deben considerarse para evaluar las causas de la degradación de maderas arqueológicas.

Degradación de la lignina

De un modo similar a las maderas arqueológicas anegadas, también se ha informado una disminución en las unidades de metiloxi y siringilo para maderas enterradas antiguas, también se observó una menor proporción de siringilaldehído a vainillina. En contraste, el rendimiento de vainillina de la madera blanda de *Torreya* de unos 6000 años de antigüedad fue casi el mismo que el de la madera reciente. Estos hallazgos están respaldados por estudios de infrarrojo sobre la lignina de pino reciente (*Pinus sylvestris*) y madera de pino de 2000 años de suelo húmedo. Esto también sugiere que la lignina de gimnosperma se degrada en menor medida que la lignina de angiosperma.

- Cambios de contenido de cenizas

Por otra parte, tanto las maderas arqueológicas anegadas como enterradas mostraron un contenido de cenizas anormal. En algunos casos, el contenido inorgánico de las maderas anegadas degradadas es más de veinte veces el valor de la madera reciente. Si bien un aumento en el contenido de cenizas es una característica de casi todas las maderas arqueológicas anegadas, se han detectado casos en los que partículas del suelo penetraron en la madera por las grietas. Por lo tanto, la determinación del contenido de cenizas debe tener en cuenta la contaminación durante el enterramiento.

• Conclusión

Indudablemente, la elección adecuada de maderas para la construcción marítima y fluvial, así como el desarrollo de métodos de protección debe considerar el conocimiento de los organismos presentes en el área y su colonización a lo largo del año. La adaptabilidad de estos grupos a distintas condiciones del entorno impone la continuación de estudios de aislamiento e identificación de las cepas bacterianas y fúngicas, así como de los macroorganismos a fin de prevenir la infestación que atenta contra la integridad de las estructuras fabricadas en madera.

Respecto de la susceptibilidad de las maderas al ataque por organismos dependerá de su dureza y composición química, principalmente de las resinas y contenido de alcaloides. Los nudos son sitios con madera muy dura, particularmente difíciles de proteger con métodos clásicos de prevención, son colonizados por los teredínidos pero no así por los limnóridos que son incapaces de horadarlos.

Aún en la actualidad y a pesar de legislaciones internacionales de protección del medio ambiente,

las maderas sumergidas se protegen del ataque de organismos con productos altamente contaminantes como por ejemplo mezclas a base de cobre, cromo y arsénico. Sin embargo, se ha detectado la presencia de bacterias resistentes a esta mezcla tóxica lo que indica que no resultan totalmente efectivas.

Es importante y necesaria la búsqueda de nuevas pinturas y recubrimientos igualmente efectivos, de amplio espectro, basados en compuestos biodegradables y que se incorporen naturalmente a los ciclos biogeoquímicos. En este sentido, la tendencia actual es hallar nuevos compuestos antiincrustantes de origen natural, identificar las moléculas bioactivas y detectar las estructuras privilegiadas responsables de la actividad a fin de poder sintetizarlas en laboratorio.

Bibliografía

- Agrawal, S., Adholeya, A., Barrow, C., Deshmukh, S. (2018). Marine fungi: An untapped bioresource for future cosmeceuticals. *Phytochem. Lett.*, 23,15-20.
- Alexopoulos, C. (1979). Introducción a la Micología, 3ra. EUDEBA, Buenos Aires.
- Baratti, M., Filippelli, M., Messana, G. (2011). Complex genetic patterns in the mangrove wood-borer *Sphaeroma terebrans* Bate, 1866 (Isopoda, Crustacea, Sphaeromatidae) generated by shoreline topography and rafting dispersal. *JEMBE*, 398, 1-2, 73-82.
- Bastida, R., Elkin, D., Grosso, M., Trassens, M., Martín, J. (2002). La corbeta de guerra inglesa HSM Swift (1770): un caso de estudio sobre los efectos del biodeterioro en el patrimonio subacuático cultural de la Patagonia. Actas de las Jornadas Científico Tecnológicas sobre Prevención y Protección del Patrimonio Cultural Iberoamericano del Biodeterioro Ambiental, 119-143. La Plata.
- Berrocal Jiménez, A. 2007. Clasificación de daños producidos por agentes de biodeterioro en la madera. *Kurú: Revista Forestal (Costa Rica)* 4, 10.
- Besser, K., Malyon, P., Eborall, W., da Cunha, G., et al. (2018). Hemocyanin facilitates lignocellulose digestion by wood-boring marine crustaceans. *Nature comm.*, 9, 5125.
- Board, P. (1970). Some observations on the tunnelling of shipworms. *J. Zool. Lond.* 161, 193-201.
- Borges, L. (2014). Biodegradation of wood exposed in the marine environment: Evaluation of the hazard posed by marine wood-borers in fifteen

- European sites. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 96, 97-104.
- Borges, L., Merckelbach, L., Sampaio, I., Cragg, S. (2014). Diversity, environmental requirements, and biogeography of bivalve woodborers (Teredinidae) in European coastal waters. *Front. Zool.*, 11, 13.
 - Cragg, S., Pitman, A., Henderson, S. (1999). Developments in the understanding of the biology of marine wood boring crustaceans and in methods of controlling them. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 43, 4, 197-205.
 - Ellison, A., Farnsworth, E. (1990). The ecology of Belizean mangrove-root fouling communities. I. Epibenthic fauna are barriers to isopod attack of red mangrove roots. *JEMBE*, 142, 91-104.
 - Enríquez, D., González, M., Ruiz, G., et al (2003). Marine fungi diversity in beaches of Havana City. *Ser. Oceanol.* 1, 1-9.
 - Fagervold S., Romano C., Kalenitchenko D., Borowski, C., Nunes-Jorge A., Martin, D., Galand, P., Dee A. Carter, Editor. 2014. Microbial communities in sunken wood are structured by wood-boring bivalves and location in a submarine canyon. *PLoS One*, 9, e96248.
 - Findlay, G. Preservation of timber in the tropics. *IT echnology & Engineering*, 2013.
 - Gaudron, S., Haga, T., Wang, H., Laming, S., Duperron, S. (2016). Plasticity in reproduction and nutrition in wood-boring bivalves (*Xylophaga atlantica*) from the Mid-Atlantic Ridge. *Mar. Biol.*, 163, 213.
 - Green Etxabe, A. The wood boring amphipod *Chelura terebrans*. Thesis. 2013.
 - Gutiérrez, A., Martínez, A. (1996). Mecanismo de biodegradación de la lignina. *Rev. Iberoam. Micol.*, 18-23.
 - Hyde, K., Fryar, S., Tian, Q., et al (2016). Lignicolous freshwater fungi along a north-south latitudinal gradient in the Asian/Australian region, can we predict the impact of global warming on biodiversity and function? *Fungal Ecol.*, 19, 190-200.
 - Jones J., Heath, K., Ferrer, A., Brown, S., Canam, T., Dalling, J. (2019). Wood decomposition in aquatic and terrestrial ecosystems in the tropics: contrasting biotic and abiotic processes. *FEMS Microbiology Ecology*, 95.
 - Jordan, B. (2001). Site characteristics impacting the survival of historic waterlogged wood: A review. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 47, 47-54.
 - Kane, D., Tam, W., Jones, E. (2002). Fungi colonising and sporulating on submerged wood in the River Severn, UK. *Fungal Divers*, 10, 45-55.
 - Kohlmeyer, J. (1976). Marine fungi from South America. *Mitteilungen aus dem Instituto Colombo-Alemán de Investigaciones Científicas Punta de Betín*, 8, 33-39.
 - Li, W., Luo, Z., Liu, J., Bhat, D., Bao, D., Su, H. (2018). Lignicolous freshwater fungi from China I: *Aquadictyospora lignicola* gen. et sp. nov. and new record of *Pseudodictyosporium wauense* from northwestern Yunnan Province. *Mycosphere*, 8, 1587-1597.
 - Malacalza, L., Martínez, A. (1971). Ascomycetes marinos de Argentina. *Boletín Soc. Argentina Botánica*, XIV, 57-72.
 - Naylor, E. (1972). British marine Isopods. *Synopses of the British Fauna* No. 3.
 - NIMPIS, 2011. *Teredo navalis*, general information. National Introduced Marine Pest Information System. <http://adl.brs.gov.au/marinepests/index.cfm?fa=main.spDetailsDB&sp=6000016293>.
 - Palanti, S., Feci, E., Anichini, M. (2015). Comparison between four tropical wood species for their resistance to marine borers (*Teredo* spp. and *Limnoria* spp.) in the Strait of Messina. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 104, 472-476.
 - Pang, K., Overy, D., Jones, E., et al (2016) 'Marine fungi' and 'marine-derived fungi' in natural product chemistry research: Toward a new consensual definition. *Fungal Biol. Rev.*, 30, 163-175.
 - Peña, N. (2000). Clave de los hongos marinos filamentosos de la provincia de Buenos Aires, Argentina. *Darwiniana*, 38, 291-298.
 - Peña, N., Arambarri, A., Negri, R., Hibbett, D. (1996). Hongos marinos lignícolas de Mar del Plata (Provincia de Buenos Aires, Argentina). *I. Darwiniana*, 34, 267-273.
 - Peña, N., Arambarri, A. (1998). Hongos marinos lignícolas de la provincia de Buenos Aires (Argentina). *IV. Darwiniana*, 35, 69-74.

- Peñaflores Ramírez, N., (2008). Patrimonio cultural sumergido: Un modelo metodológico: la Sonda o Banco de Campeche. Colección Científica, Serie Arqueología, 523.
- Quayle, D. (1992). Marine woodborers in British Columbia. Canadian Special Publication of Fisheries and Aquatic Sciences, 115.
- Rao, M., Pati, S., Swain, D., Sharma, R. (2011). Marine Wood Borers. Checklist of Indian Fauna. Zoological Survey of India.
- Scheltema, R. (1986). On dispersal and planktonic larvae of invertebrates: an eclectic overview and summary of problems. Bull. Mar. Sci., 39, 290-332.
- Sheets, E., Sarah Cohen, C., Ruiz, G., da Rocha, R. (2016). Investigating the widespread introduction of a tropical marine fouling species. Ecology and Evolution, 6, 8, 2453-2471.
- Shipway, R. (2013). Thesis. Aspects of the life history strategies of the Teredinidae. University of Portsmouth.
- Singh, A., Nilsson, T., Daniel, G. (1990). Bacterial attack of *Pinus sylvestris* wood under near-anaerobic conditions. J. Inst. Wood Sci., 11, 237-249.
- Singh, A., Butcher, J. (1991). Bacterial degradation of wood cell walls: a review of degradation patterns. J. Inst. Wood Sci., 12, 143-157.
- Singh, H., Sasekumar, A. (1996). Wooden Panel Deterioration by Tropical Marine Wood Borers. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 42, 755-769.
- Sivrikaya, H., Hafizoglu, H., Cragg, S., Carrillo, A., Militz, H., Mai, C., Borges, L. (2012). Evaluation of wooden materials deteriorated by marine-wood boring organisms in the Black Sea. Maderas. Ciencia y tecnología, 14, 79-90.
- Steciow, M. (1998). Hongos acuáticos (Chytridiomycota, Oomycota) de La Laguna Vitel y tributarios (Buenos Aires, Argentina). Darwiniana, 36, 101-106.
- Steinmayer, A., Turfa, J., 1997. Shipworms and ancient Mediterranean warships- a response. Int. J. Naut. Archaeol., 26, 345-346.
- Soo Kim, Y. & Singh A., 2000. Micromorphological characteristic of wood biodegradation in wet environments: a review. IAWA Journal, 21, 135-155.
- Sudheep, N., Sridhar, K. (2011). Diversity of lignicolous and ingoldian fungi on woody litter from the River Kali (Western Ghats, India). Mycology 2, 98-108.
- Voight, J. (2009). Diversity and reproduction of near-shore vs offshore wood-boring bivalves (Pholadidae: Xylophaginae) of the deep eastern Pacific ocean, with three new species. Journal of Molluscan Studies, 75, 2, 167-174.
- Wares, J., Gaines, S., Cunningham, C. (2001). A comparative study of asymmetric migration events across a marine biogeographic boundary. Evolution, 55, 295-306.
- Yebra, D., Kiil, S., Dam-Johansen, K. (2004). Antifouling technology-past, present and future steps towards efficient and environmentally friendly antifouling coatings. Prog. Org. Coat., 50, 75-104.
- Yennawar, P., Thakur, N., Anil, A., Venkat, K. and Wagh, A. (1999). Ecology of the wood-boring bivalve *Martesia striata* (Pholadidae) in Indian waters. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 49, 123-130.