



Modificaciones químico-anatómicas en la madera de ejemplares del arbolado urbano de La Plata (Buenos Aires) causadas por hongos de pudrición blanca (Agaricomycetes, Basidiomycota)

Chemical-anatomical modifications in the wood of specimens of urban trees in La Plata (Buenos Aires) caused by white rot fungi (Agaricomycetes, Basidiomycota)

Murace, Mónica A.^{1*}; María L. Luna²; Gustavo Lucentini^{1,3}; Laura Maly¹; Mario C. N. Saparrat^{1,4,5}

¹ Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata (FCAyF – UNLP). Calle 60 y 119, (1900) La Plata, Buenos Aires, Argentina.

² Laboratorio de Anatomía Comparada, Propagación y Conservación de Embriofitas Dr. Elías de la Sota. Facultad de Ciencias Naturales y Museo (FCNyM – UNLP). Edificio Anexo Museo, Unidades de Investigación. Boulevard 120 y 61(1900) La Plata, Buenos Aires, Argentina.

³ Centro de Investigación de Fitopatología (CIDEFI) – FCAyF – UNLP, Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (CICPBA).

⁴ Instituto de Fisiología Vegetal (INFIVE) – FCAyF – UNLP – CONICET.

⁵ Cátedra de Microbiología Agrícola (FCAyF – UNLP).

* Autor corresponsal: <monica.murace@agro.unlp.edu.ar>

RESUMEN

El contexto urbano resulta un ambiente propicio para la manifestación de pudriciones en el leño de los árboles como consecuencia del ataque de basidiomicetes xilófagos. Estos hongos causan pudrición blanca o castaña. Durante el desarrollo de las pudriciones blancas son atacados los polisacáridos estructurales y la lignina de la pared celular. Éstas pueden presentarse

► Ref. bibliográfica: Murace, M. A.; Luna, M. L.; Lucentini, G.; Maly, L.; Saparrat, M. C. N. 2024. Modificaciones químico-anatómicas en la madera de ejemplares del arbolado urbano de La Plata (Buenos Aires) causadas por hongos de pudrición blanca (Agaricomycetes, Basidiomycota). *Lilloa* 61 (2): 231-251. doi: <https://doi.org/10.30550/j.lil/1950>

► Recibido: 6 de junio 2024 – Aceptado: 20 de agosto 2024 – Publicado en línea: 18 de septiembre 2024.



► URL de la revista: <http://lilloa.lillo.org.ar>

► Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución – No Comercial – Sin Obra Derivada 4.0 Internacional.

en raíces, fustes y ramas y afectar la albura o el duramen, impactando negativamente en la supervivencia y estabilidad de los ejemplares arbóreos, y consecuentemente en los servicios ecosistémicos que ofrecen a la población. El objetivo de esta investigación fue analizar los cambios químico-anatómicos que causaron diferentes hongos de pudrición blanca en el leño de *Acer negundo*, *Prunus cerasifera* y *Quercus robur*, latifoliadas frecuentes en el arbolado público de la ciudad de La Plata. Se trabajó con secciones de madera provenientes de ramas y raíces con evidencias de pudrición. La identificación de los xilófagos fue realizada a partir de los rasgos morfobiométricos de los cultivos fúngicos y de los esporomas, y aplicando también técnicas moleculares (PCR). Los estudios químicos fueron realizados mediante química húmeda y espectroscopía infrarroja transformada de Fourier (FT-IR). Las alteraciones anatómicas se estudiaron con microscopios óptico y electrónico de barrido. Las especies xilófagas identificadas fueron: *Ganoderma resinaceum*, *Inonotus rickii* y *Phellinus pomaceus*. A nivel químico y anatómico las maderas presentaron alteraciones compatibles con pudrición blanca. Los estudios químicos permitieron identificar dos tipos de pudrición blanca: simultánea en los leños de *A. negundo* y *Q. robur*, y selectiva en el leño de *P. cerasifera*. A nivel anatómico, ambos tipos de pudrición coexistieron en las muestras (pudrición moteada). Los cambios químico-anatómicos registrados en cada interacción patógeno/hospedante estarían indicando una posible pérdida de la capacidad resistente de los árboles atacados.

Palabras clave: Hongos xilófagos; latifoliadas; leño; pudrición blanca.

ABSTRACT

The urban context is a favourable environment for the manifestation of rot in the wood of trees as a consequence of the attack of xylophagous basidiomycetes. These fungi cause white or brown rot. During the course of white rots, structural polysaccharides and lignin are attacked. These can occur in roots, stems and branches and affect the sapwood or heartwood, negatively impacting the survival and stability of tree specimens, and consequently on the ecosystem services they provide to the population. The objective of this research was to analyse the chemical-anatomical changes that caused different white rot fungi in the wood of *Acer negundo*, *Prunus cerasifera* and *Quercus robur*, common broadleaf species in the public trees of La Plata city. We worked with wood sections from branches and roots with evidence of rot. The identification of xylophagous was carried out based on the morphobiometric traits of the fungal cultures and sporomes, and also applying molecular techniques (PCR). Chemical studies were performed using wet chemistry and Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR). Anatomical alterations were studied with optical and scanning electron microscopes. The xylophagous species identified were: *Ganoderma resinaceum*, *Inonotus rickii* and *Phellinus pomaceus*. At a chemical and anatomical level, the woods

presented alterations compatible with white rot. Chemical studies allowed the identification of two types of white rot: simultaneous in the woods of *A. negundo* and *Q. robur*, and selective in the wood of *P. cerasifera*. At an anatomical level, both types of rot coexisted in the samples (mottled rot). The chemical-anatomical changes registered in each pathogen/host interaction would indicate a possible loss of the resistant capacity of the attacked trees.

Keywords: Xylophagous fungi; broadleaf; wood; white rot.

INTRODUCCIÓN

El arbolado cumple un rol fundamental en la habitabilidad y sostenibilidad de los ecosistemas urbanos debido a los múltiples beneficios ambientales, paisajísticos y socioculturales que aporta a las ciudades y a su población (Benito y Palermo, 2021). No obstante, el bosque urbano se desarrolla en un entorno con condiciones predisponentes para la manifestación de problemas sanitarios. Éstos interfieren en grado diverso en los beneficios que otorgan los árboles, pudiendo en casos extremos determinar que los ejemplares resulten un inconveniente o “diservicio”. Un ejemplo de ello son los daños a la infraestructura y/o a las personas que puede causar el vuelco de un ejemplar, o bien el desprendimiento de alguna de sus partes, como consecuencia de las pudriciones ocasionadas por los basidiomicetes xilófagos (Schwarze *et al.*, 2000; Benito y Palermo, 2021).

Los basidiomicetes xilófagos causan dos tipos principales de pudriciones: blancas y castañas, que son definidos por la apariencia y las alteraciones microestructurales que presenta la madera atacada como resultado de la actividad principalmente ectoenzimática de estos hongos (Schwarze, 2007). Durante el desarrollo de las pudriciones blancas, los hongos degradan los polisacáridos y la lignina de las paredes celulares mediante un complejo sistema enzimático compuesto por enzimas hidrolíticas y oxidativas. Dentro del grupo de las pudriciones blancas se distinguen dos tipos: blancas selectivas y simultáneas. Las pudriciones blancas selectivas surgen de un proceso de delignificación preferencial. Las simultáneas resultan de la degradación simultánea de la matriz lignocelulósica. Las maderas con este tipo de deterioro suelen adquirir coloración blanquecina (Anagnost, 1998; Schwarze, 2007). La capacidad de estos basidiomicetes o “*white rot fungi*” de mineralizar la lignina determina su importancia en el ciclo del C y en procesos de detoxificación (o biorremediación), así como sus múltiples aplicaciones en la industria textil, papelera (biopulpado), alimenticia, de los combustibles (biocombustibles), contribuyendo a que los procesos productivos sean menos contaminantes y más amigables con el ambiente (Bari *et al.*, 2021; Qi *et al.*, 2023).

En los árboles en pie, los basidiomicetes xilófagos se comportan como patógenos que pueden alojarse en el sistema radical y también a distintas

alturas del fuste y ramas de los ejemplares atacados. Algunas especies colonizan la albura mientras que otras atacan el duramen, en el último caso provocando severas pérdidas de biomasa leñosa. Los ejemplares afectados se tornan débiles estructuralmente y en consecuencia susceptibles al quiebre y vuelco. Este tipo de deterioro además constituye un riesgo potencial para el tejido fisiológicamente activo (albura), el cual puede ser atacado con el avance centrífugo de la colonización fúngica (Rayner y Boddy, 1988; Rajchenberg y Robledo, 2013).

A nivel mundial son limitadas las investigaciones en torno a los cambios químicos y anatómicos que ocurren en las maderas atacadas en condiciones naturales (Bari *et al.*, 2019). Algunas contribuciones provienen de las investigaciones de Schwarze *et al.* (1997, 2000) y Bari *et al.* (2019), quienes describen el tipo de pudrición registrada en el leño de diferentes especies de Latifoliadas y Gimnospermas del hemisferio norte. Estos trabajos reportan los patrones de degradación presentes en las muestras (tipos celulares, sector del anillo atacado, entre otros), así como el polímero estructural degradado y las alteraciones esperables en la capacidad resistente del leño de los ejemplares enfermos. En la República Argentina, son escasas las investigaciones que refieren a las pudriciones como enfermedad y a las alteraciones anatómicas que ocasionan en la madera de ejemplares en pie (Rajchenberg y Robledo, 2013). Los aportes más recientes provienen de los trabajos de Luna *et al.* (2012) y Murace *et al.* (2017, 2022a, 2022b).

Diferentes procedimientos metodológicos permiten conocer las modificaciones químicas y estructurales que ocurren en las maderas afectadas por los hongos xilófagos. La espectroscopia infrarroja transformada de Fourier (FT-IR) y la química húmeda son metodologías complementarias que contribuyen a establecer el estado químico y microestructural de la matriz polimérica de las maderas expuestas a la colonización fúngica (Pandey y Pitman, 2003, 2004; Karim *et al.*, 2016; Bari *et al.*, 2018, 2019, 2021; Rudakiya y Gupte, 2019; Belt *et al.*, 2022). En su gran mayoría, los antecedentes sobre dichos aspectos de las pudriciones surgen del estudio de maderas atacadas en condiciones controladas de laboratorio. Karim *et al.* (2016) y Bari *et al.* (2019) destacan la importancia del análisis en maderas naturalmente infectadas, teniendo en cuenta que el comportamiento de ciertas especies fúngicas varía cuando se comparan condiciones controladas de ensayo con las naturales, ya que en el último caso pueden diferenciarse barreras en el leño fisiológicamente activo, en respuesta al ataque fúngico (Shigo y Marx, 1977; Schwarze *et al.*, 2000).

En cuanto al estudio de las modificaciones anatómicas, diversos autores han utilizado distintas técnicas para identificar e interpretar con microscopios óptico y electrónico de barrido las alteraciones estructurales que estos patógenos causan en el leño (Wilcox, 1993a, 1993b; Blanchette *et al.*, 1988; Srebotnik y Messner, 1994; Anagnost, 1998; Schwarze, 2007).

El objetivo de esta investigación fue analizar los cambios químico-anatómicos que causaron diferentes hongos de pudrición blanca en el leño de

Acer negundo, *Prunus cerasifera* y *Quercus robur*, latifoliadas frecuentes en el arbolado público de la ciudad de La Plata.

El conocimiento de las alteraciones microestructurales causadas por estos xilófagos en árboles del contexto urbano puede contribuir a dimensionar el riesgo potencial de los ejemplares enfermos para los habitantes, sus bienes y la diversidad arbórea, aportando información valiosa para la toma de decisiones en el marco de un plan de manejo del arbolado urbano.

MATERIALES Y MÉTODOS

Relevamiento de ejemplares del arbolado urbano. Recolección de material leñoso y fúngico

El material fue obtenido en el marco de un relevamiento de las pudriciones del leño de árboles implantados en los espacios públicos de la ciudad de La Plata (34°55'17.2" S - 57°57.272' W). Los ejemplares de *Acer negundo* L. (Sapindaceae) (arce), *Prunus cerasifera* Ehrh. (Rosaceae) (ciruelo) y *Quercus robur* L. (Fagaceae) (roble) muestreados fueron aquellos considerados como los más representativos en cuanto a la manifestación del ataque fúngico: duramen expuesto principalmente través de heridas de poda con alteraciones en su color y consistencia compatibles con pudrición blanca, con abundante micelio y asociado a esporomas (muestreo dirigido). De cada ejemplar (tres de arce y de ciruelo con signos y síntomas similares, y uno de roble) se obtuvieron muestras de madera sana (t) (N =20) y atacada (a) (N=40) (Bari *et al.*, 2019), de entre 1 y 2 cm de lado. El material provino de ramas y raíces (Tablas 2 y 3), en el último caso de individuo volteado por una tormenta.

Hongos xilófagos: aislamiento e identificación

Los aislamientos fúngicos fueron obtenidos a partir de la siembra de pequeñas muestras de madera atacada y/o esporomas (contexto) en cajas de Petri conteniendo agar malta, antibiótico y fungicida (benomil) (Murace *et al.*, 2017). Posteriormente, las colonias desarrolladas fueron repicadas con el propósito de lograr cultivos axénicos y proceder a su identificación. La misma fue realizada a partir de las características de los aislamientos en medio agarizado (Dechamps y Wright, 1976), de los rasgos morfobiométricos de los esporomas (Urcelay *et al.*, 2012) y a través de la amplificación de la región ITS4 e ITS5 mediante la reacción en cadena de la polimerasa (PCR) según lo descrito por Lucentini *et al.* (2021). Las secuencias obtenidas fueron depositadas en el *National Center for Biotechnology Information* (NCBI) *GenBank*. También, tanto los esporomas como los aislamientos obtenidos en este trabajo fueron incorporados al Herbario y Cepario respectivamente, del Instituto Spegazzini (FCNyM-UNLP).

Tabla 1. Asignación de bandas de absorción IR en los espectros de las muestras de madera.**Tabla 1.** Assignment of IR absorption bands in the spectra of wood samples.

Número de onda (cm ⁻¹)	Grupos funcionales	Referencia
896 ± 3	vibraciones de grupos C1-H en celulosa	Hinterstoisser <i>et al.</i> (2001)
1164 ± 3	vibraciones de grupos glicosílicos C-O-C (holocelulosa)	Saparrat <i>et al.</i> (2010); Fackler <i>et al.</i> (2010)
1268 ± 2	Vibraciones de C-O del anillo guayacil (lignina)	Pandey y Pitman (2003, 2004)
1335 ± 3	Vibraciones del C-O del anillo siringyl (lignina)	Pandey y Pitman (2003, 2004)
1420 – 1430	celulosa cristalina	Poletto <i>et al.</i> (2014)
1508 ± 3	vibraciones de esqueletos aromáticos (lignina)	Shi <i>et al.</i> (2012); Jelle y Hovde (2012); Saparrat <i>et al.</i> (2010)
1734 + 4	grupos carbonilos no conjugados de pectinas y hemicelulosas (xilanos)	Luna <i>et al.</i> (2015)

Modificaciones estructurales en la madera degradada

Los estudios anatómicos se realizaron con microscopios óptico (MO) y electrónico de barrido (MEB). Para las observaciones con MO, las muestras fueron fijadas en formaldehído – ácido acético – alcohol (FAA), deshidratadas a través de una serie ascendente de etanol y embebidas en Paraplast (D'Ambroggio de Argüeso, 1986). Las secciones (10-12 μm) provenientes de los tres planos de corte (transversal, longitudinal radial y longitudinal tangencial) fueron teñidas con safranina – *fast green*. Los cortes se observaron con un microscopio óptico Nikon E200. Para los estudios con MEB, porciones de leño fueron obtenidas con cuchillas descartables. Las muestras fueron montadas sobre las platinas sin tratamiento previo y metalizadas con oro. Las observaciones se realizaron en un microscopio modelo FEI Quanta 200 (Servicio de Microscopía Electrónica de Barrido y Microanálisis del LIMF, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata) con un voltaje de 15 kV. La descripción de los caracteres observados en las maderas atacadas fue realizada siguiendo a Srebotnik y Messner (1994), Anagnost (1998) y Schwarze (2007).

Caracterización química de las maderas

El análisis de la composición química de las maderas sanas y expuestas al ataque fúngico se llevó a cabo mediante química húmeda (Normas TAPPI, adaptadas por Rodríguez, 1978) y por Espectroscopía Infrarroja Transformada de Fourier (FT-IR).

1) Química húmeda. Metodología TAPPI (adaptada por Rodríguez, 1978).— El material testigo (t) y atacado (a) seco al aire fue astillado y procesado en molino Thomas Wiley Laboratory Mill Model 4 Thom, Scientific TM USA. A continuación, las muestras de aserrín fueron tamizadas entre mallas 40/60 mm y utilizadas para realizar las siguientes determinaciones: contenido de humedad (determinado sobre 1 g de muestra a fin de referir los resultados de los análisis a peso seco); porcentaje de extraíbles en alcohol benceno (determinado sobre 2 g de aserrín expuesto a alcohol etílico 95% y tolueno 100%, 1:2 v/v, y a un tiempo de extracción de 6 h); porcentaje de extraíbles en agua caliente (determinado sobre 2 g de aserrín con 100 ml de agua destilada en Erlenmeyer colocado en condensador a reflujo y mantenido en un baño de agua en ebullición durante 3 h); porcentaje de lignina insoluble en ácido (lignina Klason) y porcentaje de celulosa. Para la determinación de lignina se mezcló 1 g de muestra con ácido sulfúrico al 96,5% (15 ml) durante 2 h a temperatura de 20 °C y bajo agitación frecuente. Luego se diluyó con 600 ml de agua destilada hirviendo para obtener una solución al 3% de ácido sulfúrico, y al cabo de 4 h de calentar bajo reflujo la mezcla ésta se filtró. El residuo de lignina se lavó con agua destilada caliente y se secó a 105 °C hasta peso constante. En cuanto al contenido porcentual de celulosa, fue determinado mediante el método de Kûrshner – Höffer. De acuerdo con esto, 1 g de material libre de extraíbles fue incorporado en un Erlenmeyer junto con 25 ml de ácido nítrico - etanol (1:4, v/v) y, posteriormente, colocado a reflujo en baño María durante 1 h. Luego se procedió al filtrado del sobrenadante en papel de filtro (operación que fue realizada 3 veces), y por último al filtrado del sobrenadante más la muestra en un crisol. A continuación, el material fue lavado con agua destilada tibia, luego con solución saturada de acetato de sodio y por último con agua tibia hasta reacción neutra. El sólido obtenido se puso a secar en estufa a 105 °C hasta peso constante, se dejó enfriar en desecador y finalmente fue pesado. Según la Norma empleada, las repeticiones fueron consideradas como válidas cuando la diferencia de los valores obtenidos entre ambas fue \leq a 0,1%.

2) Espectroscopía Infrarroja Transformada de Fourier (FT-IR).— Material particulado de cada ejemplar muestreado y condición (testigo: t y atacado: a) fue obtenido mediante lima metálica ($< 0,4$ mm), luego triturado con nitrógeno líquido y posteriormente expuesto a una serie de lavados siguiendo el procedimiento de Espiñeira *et al.* (2011). La muestra resultante fue secada a 40 °C y mantenida en una atmósfera libre de humedad hasta el momento de proceder al armado de las pastillas para obtener los espectros FT-IR. Se realizaron tres réplicas (tres pastillas) por muestra. Los espectros de absorción FT-IR fueron registrados entre 1800 y 800 cm^{-1} empleando un espectrómetro modelo Spectrum (Perkin- Elmer-Instruments). El análisis espectral se realizó a una velocidad de 1 cm s^{-1} con 4 cm^{-1} de resolución bajo atmósfera de aire seco (cámara con silicagel), obteniéndose un espectro

promedio como resultado de 64 escaneos. Para el procesamiento de los datos se utilizó el software EZ-OMNIC y se llevó a cabo la corrección de cada espectro sustrayendo automáticamente aquel correspondiente a la pastilla blanco, obtenido inmediatamente antes del registro de cada muestra. Para bandas consideradas de referencia de los polímeros de la madera (Tabla 1), se estimaron intensidades relativas siguiendo a Pandey y Pitman (2003, 2004) y Luna *et al.* (2015).

3) Análisis estadístico de las alteraciones químicas determinadas mediante FT-IR.— Con los datos obtenidos del análisis espectral (n=3 muestras atacadas y n=3 muestras testigo), se obtuvieron las relaciones de la composición química de la madera testigo y atacada. Las mismas fueron comparadas utilizando la prueba de t de Student, con un nivel de confianza del 95%. Para el análisis se utilizó el software Infostat versión 2020.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Hongos xilófagos

En los materiales muestreados fueron identificadas especies responsables de pudrición blanca, una perteneciente al Orden Polyporales: *Ganoderma resinaceum* Boud. en *Quercus robur* (LPSC 1389; OM574644), y dos a Hymenochaetales: *Inonotus rickii* (Pat.) D.A. Reid en *Acer negundo* (LPSC 1386; OM574634) y *Phellinus pomaceus* (Pers.) Maire en *Prunus cerasifera* (LPS 49109; OM574636), ambos órdenes correspondientes a la Clase Agaricomycetes. Las interacciones patógeno-hospedante halladas son frecuentes en el arbolado de los espacios urbanos de distintas regiones de nuestro país y del mundo. Además, la ubicación de los hongos en sus hospedantes (ramas y sistema radical) y sector del leño invadido (duramen), se corresponden con la estrategia de colonización citada para las especies xilófagas de cada interacción (Rayner y Boddy, 1988; Schwarze *et al.*, 2000; Urcelay *et al.*, 2012).

Modificaciones estructurales en la madera degradada

A ojo desnudo y con lupa se identificaron rasgos de pudrición blanca en todas las interacciones madera-patógeno. Las muestras de roble y ciruelo presentaron coloración blanquecina y las de arce coloración castaña, la cual fue notablemente más intensa en el frente de avance de la pudrición. En términos generales, la totalidad del material se caracterizó por su aspecto fibrilar (poco acentuado en las muestras de ciruelo) y consistencia esponjosa a corchosa (notable en ciruelo), como también por la presencia de micelio en vasos y en zonas con total degradación. La consistencia corchosa se corresponde con el concepto de estado intermedio de degradación. De acuerdo con Zabel y Morrell (1992), en este estado de deterioro el tejido presenta

notables cambios en color y textura debido a la distribución del micelio en la madera, aunque su estructura no haya sido lo suficientemente alterada como para transformarlo en un material esponjoso y notablemente fibrilar, característico de las últimas etapas de degradación, rasgos que fueron observados en las muestras de arce y roble.

Con microscopios óptico (MO) y electrónico de barrido (MEB), en las muestras se observó la concentración de micelio en el interior de los vasos, en los radios parenquimáticos y en menor medida en los lúmenes de las fibras (Fig. 1 A-B; Fig. 2 A). En ellas fueron identificados varios caracteres típicos de pudrición blanca selectiva y simultánea (Anagnost, 1998; Schwarze, 2007). Con MO, la etapa temprana de pudrición blanca selectiva (PBse) se puso de manifiesto en las muestras de roble donde se observó la delignificación preferencial y de avance centrífugo en las paredes de las fibras, evidenciada por su coloración verdosa en cortes transversales teñidos con safranina-*fast green* (Fig. 1 C). En muestras con signos de PBse un poco más avanzada, como las de arce, se observó con MO y MEB la separación entre células (Fig. 1 D-E; Fig. 2 B). Anagnost (1998) considera que la separación celular por destrucción de la laminilla media compuesta es el carácter de diagnóstico más relevante de este tipo de pudrición blanca.

En cuanto a los caracteres de pudrición blanca simultánea (PBsi), la presencia de abundante micelio en los vasos es un indicativo de este tipo de pudrición (Fig. 1 B) y del rol que cumplen los vasos como principal vía de colonización del leño (Anagnost, 1998; Schwarze, 2007). Con MO se visualizó además el adelgazamiento de las paredes celulares, particularmente en las fibras, con la consecuente deformación del tejido (Fig. 1 A). El ataque preferencial a las fibras se corresponde con el predominio de siringil lignina, considerada la más susceptible a la degradación (Schwarze, 2007). En estadios más avanzados se originaron agujeros en algunos sectores del leño, debido a la degradación total de las paredes celulares (Fig. 1 F). En las muestras de arce, la presencia de masas de micelio concentradas en áreas del tejido con total degradación y de contenidos, resultan consistentes con la coloración observada y la formación de duramen patológico, tipo de tejido citado para esta especie (Murace *et al.*, 2019). Otros caracteres diagnósticos de PBsi identificados microscópicamente fueron la erosión de las punteaduras y la presencia de agujeros y de senderos de erosión en las paredes de distintos tipos celulares (Fig. 1 G-H; Fig. 2 C) (de acuerdo a Anagnost, 1998). Se observaron también hifas atravesando las punteaduras (Fig. 1 I; Fig. 2 D-E).

La coexistencia de pudrición blanca selectiva y simultánea en distintos sectores del tejido de arce, ciruelo y roble se corresponde con el concepto de pudrición blanca moteada (PBmo) o “*mottled rot*” (Otjen y Blanchette, 1986). Según se mencionó, las pudriciones blancas selectivas surgen de un proceso de delignificación preferencial, mientras que en las simultáneas ocurre la despolimerización simultánea del complejo lignocelulósico (Anagnost, 1998; Schwarze, 2007). Las PBmo son frecuentes en maderas colonizadas por cepas

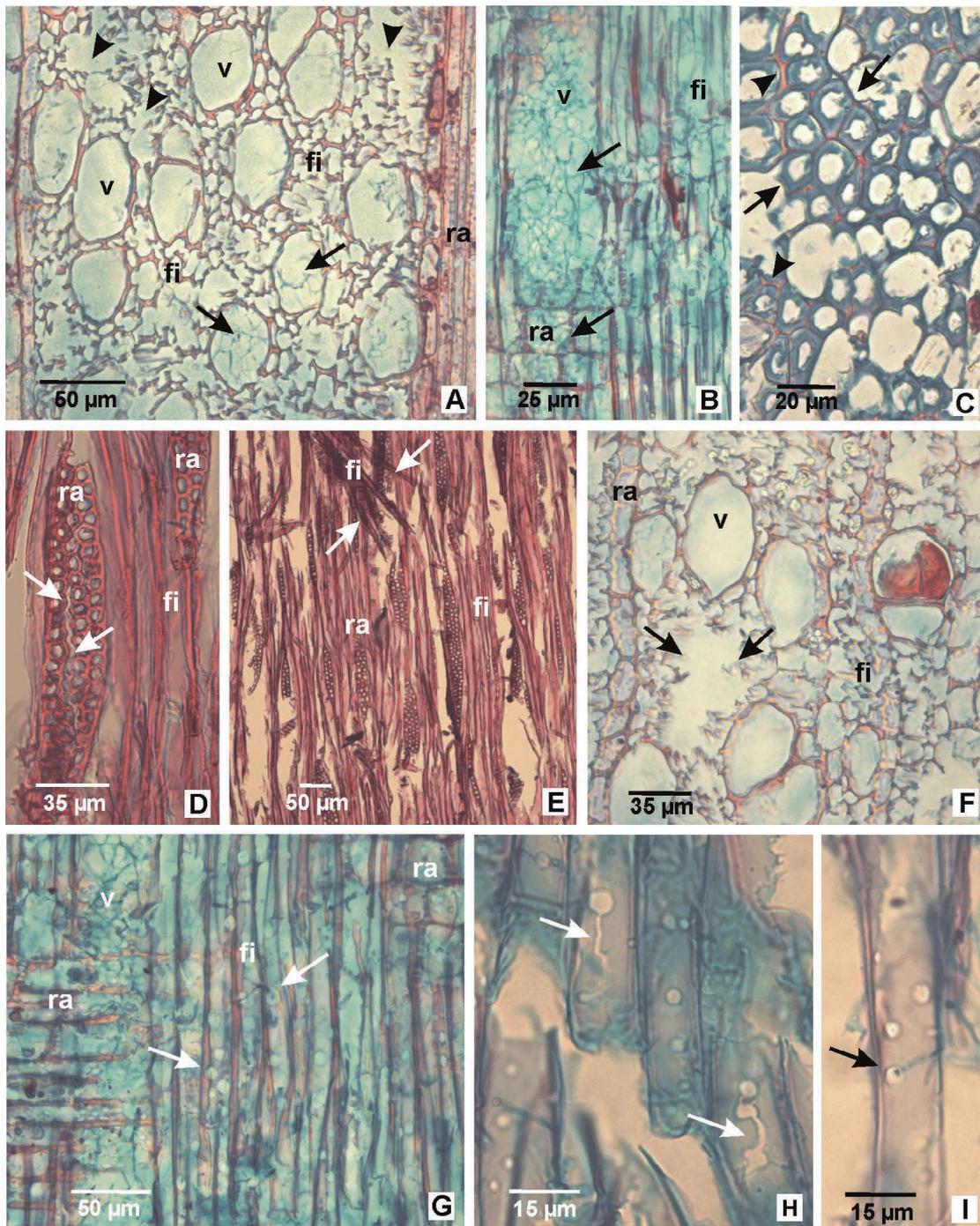


Fig. 1. Fotografías con microscopio óptico de leños degradados por distintos hongos xilófagos. A) *Prunus cerasifera*. Corte transversal donde se observa la acumulación de hifas en los vasos (flechas) y el ataque preferencial de las fibras (puntas de flecha). B) *Prunus cerasifera*. Corte longitudinal radial mostrando la proliferación del micelio en vaso, radio y fibras. C) *Quercus robur*. Corte transversal ilustrando delignificación selectiva en fibras (flechas). La laminilla media aparece teñida de rojo (puntas de flecha). D) *Acer negundo*. Corte longitudinal tangencial. Separación celular en radio parenquimático (flechas). E) *Acer negundo*. Corte longitudinal tangencial. Separación entre fibras en estadio más avanzado de delignificación selectiva (flechas). F) *Prunus cerasifera*. Corte transversal mostrando un agujero en el tejido debido al colapso de las fibras (flecha). G) *Prunus cerasifera*. Corte longitudinal radial donde se observa erosión de punteaduras (flechas). H) *Acer negundo*. Senderos de erosión en paredes de fibras (flechas). I) *Acer negundo*. Detalle de hifa atravesando una punteadura (flecha). (v) vaso, (fi) fibra, (ra) radio. ➤

► **Fig. 1.** Light microscope photographs of woods degraded by different xylophagous fungi. A) *Prunus cerasifera*. Transverse section showing the accumulation of hyphae in vessels (arrows) and the preferential attack of the fibers (arrowheads). B) *Prunus cerasifera*. Radial longitudinal section showing the proliferation of mycelium in a vessel, rays and fibers. C) *Quercus robur*. Transverse section illustrating selective delignification in fibers (arrows). The middle lamella appears stained red (arrowheads). D) *Acer negundo*. Tangential longitudinal section. Cell separation in parenchyma ray (arrows). E) *Acer negundo*. Tangential longitudinal section. Separation among fibers in more advanced stage of selective delignification (arrows). F) *Prunus cerasifera*. Transverse section showing a hole in the tissue due to the collapse of the fibers (arrow). G) *Prunus cerasifera*. Radial longitudinal section where pit erosion is observed (arrows). H) *Acer negundo*. Erosion troughs in fiber walls (arrows). I) *Acer negundo*. Detail of hypha passing through a pit (arrow). (v) vessel, (fi) fiber, (ra) ray.

xilófagas que se comportan como delignificadoras selectivas, como lo son las integrantes de las interacciones analizadas (Blanchette, 1984a; Blanchette *et al.*, 1985; Otjen y Blanchette, 1986; Otjen *et al.*, 1987; Robles *et al.*, 2014).

Desde el punto de vista mecánico, ambos tipos de pudrición blanca se comportan de modo diferente en los estados incipientes de la degradación. Las blancas selectivas son consideradas las menos agresivas. La madera afectada por este tipo de deterioro pierde rigidez, dureza y resistencia a la compresión a causa de la descomposición selectiva de la lignina, no obstante, incrementa suavemente su resistencia a la flexión dinámica y tensión a causa de la celulosa residual (Schwarze *et al.*, 2000). Debe tenerse en cuenta que luego de la delignificación suele ocurrir la destrucción de la celulosa. Así, en maderas con estados más avanzados de pudrición blanca selectiva y simultánea, la resistencia a la flexión dinámica se reduciría notablemente como producto de la completa degradación de la matriz lignocelulósica (Schwarze *et al.*, 1997; Schwarze *et al.*, 2000; Schwarze, 2007).

Caracterización química de las muestras de madera

1) Química húmeda. Metodología TAPPI (adaptada por Rodríguez, 1978).— Mediante química húmeda, en las muestras atacadas (a) (excepto para la interacción *P. pomaceus*-ciruelo) se identificó una disminución en el porcentaje de celulosa (C), comparativamente en mayor proporción que el de lignina (L) ($\%C_{(a)} / \%C_{(t)}$ vs $\%L_{(a)} / \%L_{(t)}$), rasgo particularmente acentuado en la muestra de roble y que se correspondió con un incremento relativo pronunciado en la proporción de L. La degradación preferencial de la C se evidenció también mediante la relación $C_{(a)} / L_{(a)}$, la cual en *P. pomaceus*-ciruelo, indicó que la L fue atacada preferentemente.

En referencia a los extraíbles en alcohol benceno (ROH-B) y agua caliente (Ac), se determinó un notable incremento relativo de los mismos en roble y arce, rasgo evidenciado mediante las relaciones $ROH-B_{(a)} / ROH-B_{(t)}$ y $Ac_{(a)} / Ac_{(t)}$. En ciruelo, los extraíbles de naturaleza lipofílica fueron atacados de manera preferencial, resultado opuesto a lo hallado en roble (Tabla 2).

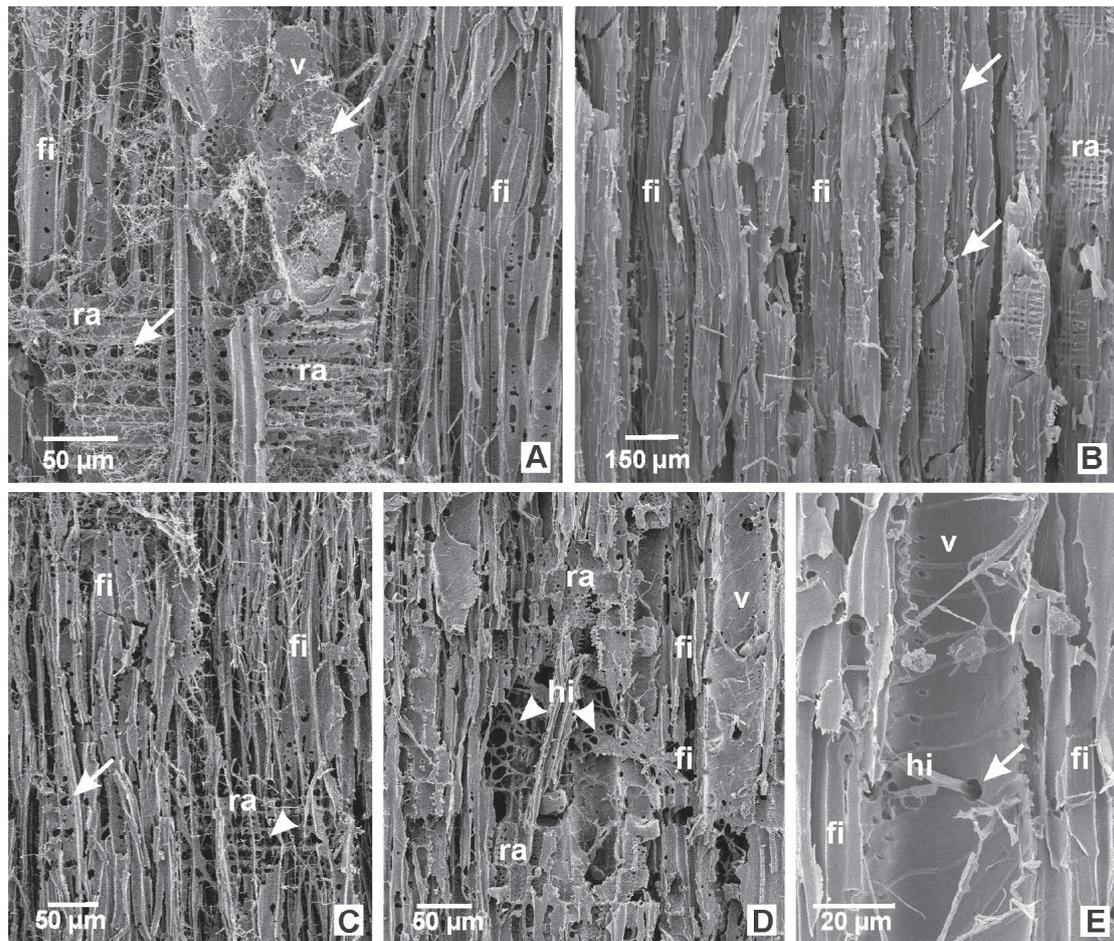


Fig. 2. Fotografías con microscopio electrónico de barrido de leños degradados por distintos hongos xilófagos. A) *Acer negundo*. Corte longitudinal radial mostrando abundante micelio en vasos y radios (flechas). B) *Quercus robur*. Corte longitudinal radial donde se observa la separación celular entre elementos de vaso como producto de la delignificación selectiva (flechas). C) *Acer negundo*. Corte longitudinal radial ilustrando erosión de punteaduras en fibras (flechas) y agujeros en paredes de fibras y parénquima de los radios (puntas de flecha). D) *Prunus cerasifera*. Corte longitudinal radial. Las puntas de flechas indican agujeros en un vaso. Se observa también un radio erosionado con hifas en su interior. E) *Prunus cerasifera*. Hifa atravesando la pared de un vaso (flecha). (v) vaso, (fi) fibra, (ra) radio, (hi) hifa.

Fig. 2. Scanning electron microscope photographs of woods degraded by different xylophagous fungi. A) *Acer negundo*. Longitudinal radial section showing abundant mycelium in vessels and rays (arrows). B) *Quercus robur*. Radial longitudinal section where cell separation is observed in vessels as a product of selective delignification (arrows). C) *Acer negundo*. Radial longitudinal section illustrating pit erosion in fibers (arrows) and holes in fiber walls and ray parenchyma (arrowheads). D) *Prunus cerasifera*. Radial longitudinal section. Arrowheads indicate holes in a vessel. An eroded ray with hyphae inside is also observed. E) *Prunus cerasifera*. Hypha passing through a vessel wall (arrow). (v) vessel, (fi) fiber, (ra) ray, (hi) hiphae.

2) Espectroscopía Infrarroja Transformada de Fourier (FT-IR).— Respecto a lo obtenido mediante FT-IR, en todas las muestras atacadas (a) se manifestó la alteración de la matriz lignocelulósica. La actividad de los hongos redujo la intensidad de absorbancia (IA) de componentes específicos de las maderas como las fracciones amorfas (Ca) y cristalinas (Cc)

Tabla 2. Caracterización química de las maderas analizadas según la metodología de química húmeda.
Table 2. Chemical characterization of the analyzed woods according to the wet chemistry methodology.

Hongo	Hospedante	Condición	Determinaciones					
			Celulosa %	Lignina %	C/L	Extraíbles		
						ROH-B	Ac	ROH-B/Ac
<i>Ganoderma resinaceum</i>	roble	t	60,26a	18,11a	3,33a	5,70a	12,60a	0,45a
	raíz	a	46,13b (-0,76)	21,36b (+1,18)	21,36b (+1,18)	11,60b (+2,03)	17,40b (+1,38)	0,66b
<i>Inonotus rickii</i>	arce	t	58,35a	28,55a	28,55a	1,71a	5,43a	0,31a
	rama	a	51,39b (-0,88)	27,40b (-0,96)	27,40b (-0,96)	2,90b (+1,70)	11,96b (+2,20)	0,24a
<i>Phellinus pomaceus</i>	ciruelo	t	48,08a	23,21a	23,21a	5,33a	7,03a	0,76a
	rama	a	46,41b (-0,96)	19,11b (-0,82)	19,11b (-0,82)	2,84b (-0,53)	6,35b (-0,90)	0,45b

Referencias: t, testigo; a, muestras atacadas; C, celulosa; L, lignina; C/L, relación celulosa / lignina; ROH-B, alcohol benceno; AC, agua caliente; ROH-B/Ac, relación alcohol benceno/agua caliente. Letras distintas indican diferencias significativas; se consideran como tal, diferencias > a 0,10 (Rodríguez, 1978; Pandey y Pitman, 2003); (+, -), aumento / disminución surgido de la relación % $X_{(a)} / \%X_{(t)}$.

References: t, control; a, samples attacked; C, cellulose; L, lignin; C/L, cellulose/lignin ratio; ROH-B, benzene alcohol; AC, hot water; ROH-B/Ac, alcohol-benzene/hot water ratio. Different letters indicate significant differences; differences > to 0.10 are considered as such (Rodríguez, 1978; Pandey y Pitman, 2003); (+, -), increase/decrease arising from the relationship % $X_{(a)} / \%X_{(t)}$.

de la celulosa (Ca: $896 \pm 3 \text{ cm}^{-1}$; Cc: $1420\text{-}1430 \text{ cm}^{-1}$), y las hemicelulosas (Hs: $1734 + 4 \text{ cm}^{-1}$), en correspondencia con lo obtenido para la IA de la holocelulosa (HI: 1164 ± 3 ; $1158 + 3 \text{ cm}^{-1}$), y la lignina (L: $1508 \pm 3 \text{ cm}^{-1}$) (Fig. 3). En referencia a los polisacáridos y sus relaciones (IAR) (Tabla 3), se detectó la remoción de la Ca por sobre la HI, Hs, Cc y L a partir de las disminuciones significativas (respecto de t) en las IARs I_{896}/I_{1164} , I_{896}/I_{1734} , I_{896}/I_{1429} e I_{896}/I_{1508} , respectivamente, excepto en la interacción *P. pomaceus*-ciruelo. En referencia a la L y al resto de las fracciones de polisacáridos (HI, Hs y Cc), en *P. pomaceus*-ciruelo la L fue atacada en mayor proporción que la HI, tal como revelado por la menor IAR I_{1508}/I_{1164} obtenida, observándose sólo una leve tendencia en dicho sentido en *G. resinaceum*-roble e *I. rickii*-arce. En cuanto a las IARs L/Hs: I_{1508}/I_{1734} e IAR L/Cc: I_{1508}/I_{1429} , no se evidenció la remoción preferencial de la L. Las unidades siringyl (S) de este polímero, fueron las preferentemente atacadas (menor IAR I_{1268}/I_{1335}) (Tabla 3).

Las alteraciones detectadas mediante química húmeda y FT-IR resultaron compatibles con pudrición blanca (PB), tipo de deterioro que producen los hongos aislados de las muestras e identificado mediante los estudios anatómicos. Respecto a la mayor degradación de la celulosa paracrystalina, lo hallado se corresponde con su predominio en la madera, su importancia para el crecimiento fúngico y la co-metabolización de la lignina, junto con su alta susceptibilidad a la degradación. El ataque a esta fracción amorfa conduce inevitablemente al incremento relativo del resto de los componentes del leño (Blanchette, 1984b; Ejechi *et al.*, 1996;

Bari *et al.*, 2019). En referencia a la lignina, excepto para la combinación *P. pomaceus*-ciruelo, los resultados no se asociaron con el comportamiento delignificador selectivo citado para las especies fúngicas integrantes de las interacciones, y por ello reconocidas por causar PB de tipo selectiva (PBse) (Blanchette, 1984a; Blanchette *et al.*, 1985; Otjen *et al.*, 1987; Robles *et al.*, 2014). En este sentido, inicialmente resultó inesperado el aumento relativo en el contenido de lignina determinado mediante química húmeda en la combinación *G. resinaceum*-roble, así como lo obtenido mediante la relación I_{1508}/I_{1164} , indicadora de pudrición blanca simultánea (PBsi) (Pandey y Pitman, 2003) en *G. resinaceum*-roble e *I. rickii*-arce. No obstante, lo hallado resultó compatible con la pudrición blanca moteada (PBmo) identificada en las muestras mediante los estudios anatómicos. En los leños afectados por PBmo la degradación preferencial de la lignina frecuentemente queda enmascarada (Otjen y Blanchette, 1986).

La falta de evidencias de pudrición blanca selectiva puede ser el resultado de su posible enmascaramiento por la presencia de un mosaico de distintos tipos y estados de pudrición, que determinan la persistencia de sectores del tejido altamente lignificados como lo son la laminilla media compuesta y los vasos (Blanchette *et al.*, 1988; Skyba *et al.*, 2013), o a las condiciones ambientales que modulan la intensidad y el patrón de distribución de la delignificación selectiva (Blanchette, 1991), así como a variaciones intraespecíficas de las especies de hongos estudiadas (van Heerden *et al.*, 2008). También, a la formación de pseudoligninas debido a fenómenos de repolimerización de compuestos derivados de la degradación de la lignina y/o de la fracción de extraíbles (Martínez *et al.*, 2005; Skyba *et al.*, 2013; Toledo *et al.*, 2017; Lancha *et al.*, 2021). En referencia a la interacción *P. pomaceus*-ciruelo, si bien las muestras de madera presentaron pudrición blanca moteada, la delignificación selectiva detectada a nivel químico podría explicarse por la ocurrencia poco extendida y avanzada de la pudrición blanca simultánea, en correspondencia con la consistencia corchosa detectada al tacto.

En cuanto a los extraíbles hidro- y lipofílicos, sus incrementos relativos y en especial los de naturaleza lipofílica, pueden estar relacionados a la acumulación de los productos de despolimerización debido a una limitada capacidad de absorción, así como a la dificultad para degradarlos o a la presencia de distintos estadios de pudrición o la concentración de micelio fúngico (Kirk y Highley, 1973; Schwarze *et al.*, 2000). Los aumentos relativos de los porcentajes de los extraíbles de naturaleza lipo- e hidrofílica detectados en arce, se corresponden con la presencia de contenidos identificada y la formación de duramen patológico (Murace *et al.*, 2019). Respecto a la preferente degradación de las unidades syringyl lignina (S) registrada en el presente trabajo, distintos estudios sugieren su baja resistencia a la degradación por especies de pudrición blanca (Saito *et al.*, 2012; Skyba *et al.*, 2013).

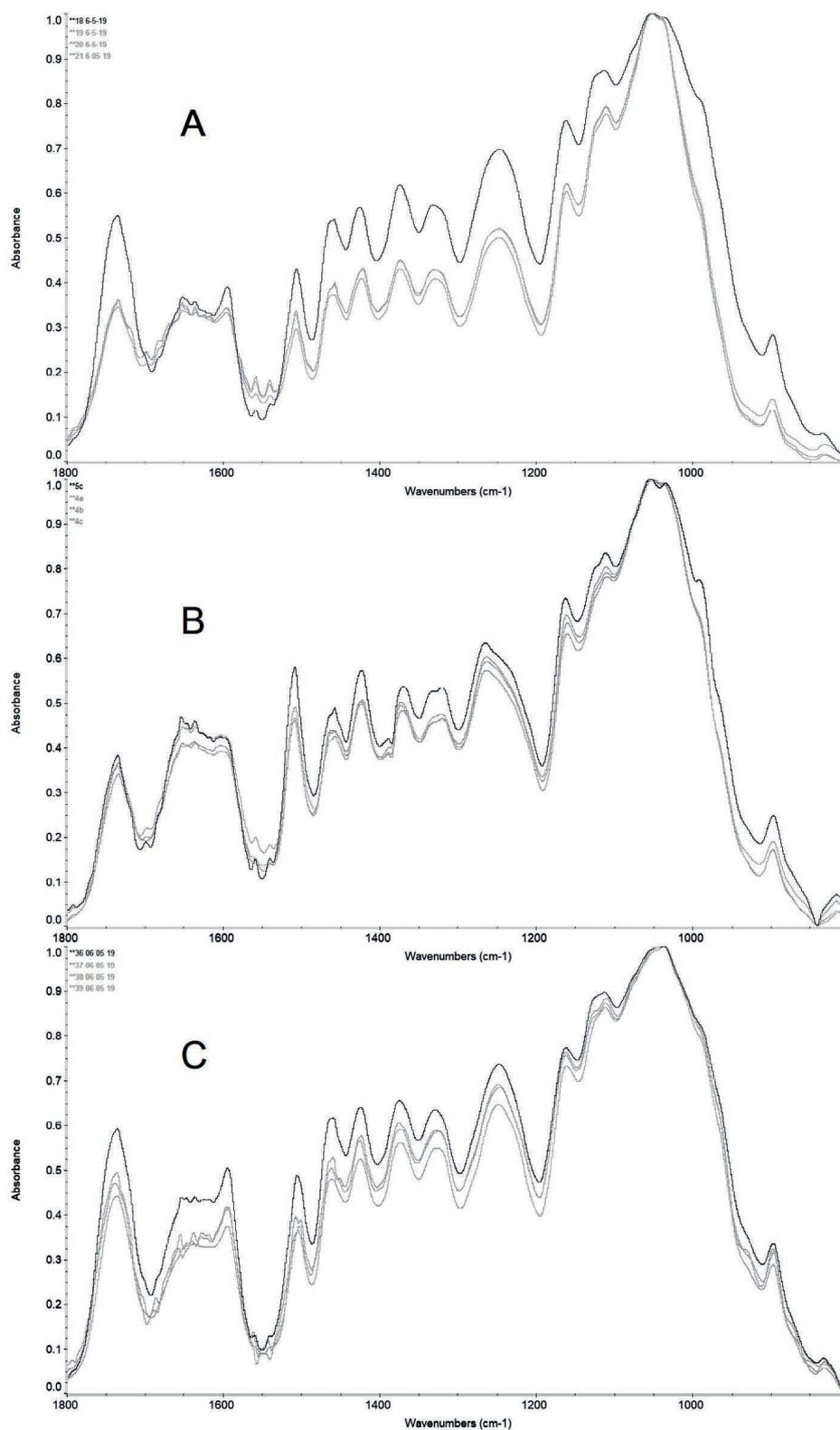


Fig. 3. Espectros FT-IR de las maderas degradadas por distintos hongos de pudrición blanca. A) roble-*G. resinaceum*. B) arce-*I. rickii*. C) ciruelo-*P. pomaceus*. (línea color negro) madera testigo, (línea de color gris) madera atacada.

Fig. 3. FT-IR spectra from woods decayed by different white rot fungi. A) *G. resinaceum*-oak. B) *I. rickii*-maple. C) *P. pomaceus*-plum. (black line) control wood, (grey line) attacked wood.

Tabla 3. Relación entre la intensidad de absorbancia de grupos funcionales específicos de polímeros componentes de la madera y su variación por la actividad de hongos causantes de pudrición blanca.

Table 3. Relationship between the absorbance intensity of specific functional groups of wood component polymers and their variation due to the activity of white rot fungi.

Interacción Condición de la muestra ²			Intensidades de Absorbancia Relativas (IAR) ¹							
			I896/I1164 cel/holo	I896/I1734 cel/hemi	I896/I1429 cel/cel cr	I896/I1508 cel/lig	I1508/I1734 lig/hemi	I1508/I1164 lig/holo	I1508/I1429 lig/cel cr	I1335/I1268 lig s/g
<i>Ganoderma resinaceum</i>	roble	t	0,37a (3,84)	0,51a (2,26)	0,50a (3,97)	0,65a (1,39)	0,79a (1,08)	0,56a (2,48)	0,77a (2,85)	0,88a (1,03)
	raíz	a	0,20b (10,55)	0,34b (10,50)	0,29b (9,73)	0,38b (8,74)	0,90b (4,16)	0,53a (4,99)	0,77a (3,73)	0,88a (1,66)
<i>Inonotus rickii</i>	arce	t	0,33a (1,17)	0,65a (1,02)	0,44a (4,60)	0,45a (9,35)	1,47a (8,11)	0,74a (9,40)	0,99a (4,57)	0,82a (0,39)
	rama	a	0,27b (8,50)	0,50b (8,81)	0,36b (4,99)	0,37b (1,94)	1,34a (6,85)	0,72a (6,77)	0,96a (3,41)	0,78b (1,49)
<i>Phellinus pomaceus</i>	ciruelo	t	0,49a (10,36)	0,63a (10,43)	0,57a (8,08)	0,76a (12,30)	0,66a (17,62)	0,64a (7,34)	0,75a (6,11)	0,94a (2,77)
	rama	a	0,41a (3,96)	0,66a (4,03)	0,56a (1,93)	0,85a (11,96)	0,66a (4,03)	0,49b (8,26)	0,64a (9,65)	0,89a (0,34)

Referencias: 1: I896/I1164, celulosa/holocelulosa; I896/I1734, celulosa/hemicelulosas; I896/I1429, celulosa/celulosa cristalina; I896/I1508, celulosa/lignina; I1508/I1734, lignina/hemicelulosas; I1508/I1164, lignina/holocelulosa; I1508/I1429, lignina/celulosa cristalina; I1335/I1268, lignina siringyl (S) / guaiacyl (G). 2: t, testigo; a, madera atacada. 3: Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$, Tukey). El coeficiente de variación (CV), se indica entre paréntesis.

References: 1: I896/I1164, cellulose/holocellulose; I896/I1734, cellulose/hemicelluloses; I896/I1429, cellulose/crystalline cellulose; I896/I1508, cellulose/lignin; I1508/I1734, lignin/hemicelluloses; I1508/I1164, lignin/holocellulose; I1508/I1429, lignin/crystalline cellulose; I1335/I1268, lignin siringyl (S) / guaiacyl (G). 2: t, control; a, attacked wood. 3: Different letters indicate significant differences ($p \leq 0.05$, Tukey). The coefficient of variation (CV) is indicated in parentheses.

CONCLUSIONES

Este trabajo brinda información sobre las alteraciones químico-anatómicas que ocurren en maderas de árboles en pie implantados en la ciudad de La Plata (Buenos Aires, Argentina), infectados naturalmente por hongos xilófagos. Las especies identificadas, *Ganoderma resinaceum*, *Inonotus rickii* y *Phellinus pomaceus* (Basidiomycota, Agaricomycetes) causaron modificaciones típicas de pudrición blanca en la madera de ejemplares de roble, arce y ciruelo, respectivamente. Este tipo de investigaciones aporta datos valiosos que permiten inferir los perjuicios a lo que están expuestos los ejemplares arbóreos de las especies consideradas en esta investigación, al estar afectados por los patógenos identificados, información indispensable a la hora de tomar decisiones durante la gestión de la forestación urbana.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue realizada gracias a los recursos financieros derivados de los subsidios correspondientes al Proyecto de Incentivos a la Investigación (A/355 y A344) de la Universidad Nacional de La Plata; CONICET (PIP 11220200100527CO) y FONCyT (PICT 2019-0207; PICT 2021 Aplicados CAT II 00036).

CONFLICTO DE INTERESES

No existen conflictos de intereses entre autores o con terceros.

BIBLIOGRAFÍA

- Anagnost, S. E. (1998). Light microscopic diagnosis of wood decay. *IAWA Journal* 19 (2): 141-167.
- Bari, E., Mohebbi, B., Naji, H. R., Oladi, R., Yilgor, N., Nazarnezhad, N., Ohno, K. M. y Nicholas, D. (2018). Monitoring the cell wall characteristics of degraded beech wood by white-rot fungi: anatomical, chemical, and photochemical study. *Maderas. Ciencia y Tecnología* 20 (1): 35-56. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2018005001401>
- Bari, E., Daryaeib, M. G., Karimb, M., Bahmanic, M., Schmidtd, O., Woodward, S., Ghanbaryf, M. A. T. y Sistanig, A. (2019). Decay of *Carpinus betulus* wood by *Trametes versicolor* - An anatomical and chemical study. *International Biodeterioration & Biodegradation* 137: 68-77.
- Bari, E., Ohno, K., Yilgor, N., Singh, A. P., Morrell, J. J., Pizzi, A., Tajick Ghanbary, M. A. y Ribera, J. (2021). Characterizing Fungal Decay of Beech Wood: Potential for Biotechnological Applications. *Microorganisms* 9: 247. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9020247>
- Belt, T., Awais, M. y Mäkelä, M. (2022). Chemical Characterization and Visualization of Progressive Brown Rot Decay of Wood by Near Infrared Imaging and Multivariate Analysis. *Frontiers in Plant Science* 13: 940745. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.940745>
- Benito, G. y Palermo, M. (2021). El árbol en la ciudad: Manual de arboricultura urbana. Editorial Facultad de Agronomía.
- Blanchette, R. A. (1984a). Screening wood decayed by white rot fungi for preferential lignin degradation. *Applied and Environmental Microbiology* 48 (3): 647-653.
- Blanchette, R. A. (1984b). Selective delignification of Eastern Hemlock by *Ganoderma tsugae*. *Phytopathology* 74 (2): 153-160.
- Blanchette, R. A. (1991). Delignification by wood-decay fungi. *Annual Review of Phytopathology* 29: 381-398.
- Blanchette, R. A., Otjen, L., Effland, M. J. y Eslyn, W. E. (1985). Changes in structural and chemical components of wood delignified by fungi. *Wood Science and Technology* 19: 35-46.

- Blanchette, R. A., Obst, J. R., Hedges, J. L. y Weliky, K. (1988). Resistance of hardwood vessels to degradation by white rot Basidiomycetes. *Canadian Journal of Botany* 66: 1841-1847.
- D'Ambrogio de Argüeso, A. (1986). Libro de técnicas histológicas en plantas. Ed. Hemisferio Sur, Buenos Aires.
- Deschamps, J. y Wright, J. J. (1976). Clave para el reconocimiento en cultivo de las especies xilófagas de Basidiomycetes argentinae. *Revista de Investigaciones Agropecuarias*, INTA, Bs. As., Rep. Argentina. Serie V, Patología Vegetal XII (2).
- Ejechi, B. O., Obuekwe, C. O. y Ogbimi, A. O. (1996). Microchemical studies of wood degradation by brown and white rot fungi in two tropical timbers. *International Biodeterioration & Biodegradation* 38: 119-122.
- Espiñeira, J. M., Novo Uzal, E., Gómez Ros, L. V., Carrión, J. S., Merino, F., Ros Barceló, A. y Pomar, F. (2011). Distribution of lignin monomers and the evolution of lignification among lower plants. *Plant Biology* 13: 59-68.
- Fackler, K., Stevanic, J. S., Ters, T., Hinterstoisser, B., Schwanninger, M. y Salmén, L. (2010). Localization and characterization of incipient brown-rot decay within spruce wood cell walls using FT-IR imaging microscopy. *Enzyme Microbiology and Technology* 47 (6): 257-267.
- Hinterstoisser, B., Jalkanen, R., Nowotny, M. y Schwanninger, M. (2001). Lignification of Scots Pine trees from Arctic Circle up to timberline. *Buvisindi Icelandic Agricultural Sciences* 14: 55-59.
- Jelle, B. P. y Hovde, P. J. (2012). Fourier Transform Infrared Radiation Spectroscopy for wood rot decay and mould fungi growth detection. *Advances in Materials Science and Engineering Article*. Id 969360.
- Karim, M., Daryaei, M. G., Torkaman, J., Oladi, R., Ghanbary, M. A. T. y Bari, E. (2016). In vivo investigation of chemical alteration in oak wood decayed by *Pleurotus ostreatus* *International Biodeterioration & Biodegradation* 108: 127-132.
- Kirk, T. K. y Highley, T. L. (1973). Quantitative changes in structural components of conifer woods during decay by white and brown rot fungi. *Phytopathology* 63: 1338-1342.
- Lancha, J. P., Perré, P., Colin, J., Lv, P., Ruscassier, N. y Almeida, G. (2021). Multiscale investigation on the chemical and anatomical changes of lignocellulosic biomass for different severities of hydrothermal treatment. *Scientific Reports* 11: 8444. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-87928-y>
- Lucentini, C. G., Medina, R., Franco, M. E., Saparrat, M. C. y Balatti, P. A. (2021). *Fulvia fulva* [syn. *Cladosporium fulvum*, *Passalora fulva*] races in Argentina are evolving through genetic changes and carry polymorphic avr and ecp gene sequences. *European Journal of Plant Pathology* 159 (3): 525-542.

- Luna, M. L., Murace, M., Robledo, G. y Saparrat, M. (2012). Characterization of *Schinopsis haenkeana* wood decayed by *Phellinus chaquensis* (Basidiomycota, Hymenochaetales). *IAWA Journal* 33 (1): 91-104.
- Luna, M. L., Ramos Giacosa, J. P., Giudice, G. E., Fernández, P. V., Ciancia, M. y Saparrat, M. (2015). Structure and chemistry of the xylem of arborescent species of *Blechnum* from South America. *IAWA Journal* 36: 3-21.
- Martínez, A.T., Speranza, M., Ruiz-Dueñas, F. J., Ferreira, P., Camarero, S., Guillén, F., Martínez, M., Gutiérrez, A. y del Río, J. C. (2005). Biodegradation of lignocellulosics: microbial, chemical, and enzymatic aspects of the fungal attack of lignin. *International Microbiology* 8: 195-204.
- Murace, M., Luna, M. L., Ciuffani, M. G. y Perelló, A. (2017). Modificaciones anatómicas y químicas en el leño de ejemplares del arbolado de la ciudad de La Plata (Buenos Aires) causadas por *Laetiporus sulphureus* (Basidiomycota, Polyporales). *Boletín Sociedad Argentina de Botánica* 52 (4): 647-661.
- Murace, M. A., Luna, M. L., Lucentini, G. y Perelló, A. (2019). Duramen patológico en ejemplares de *Acer negundo* L. del arbolado de la ciudad de La Plata (Buenos Aires). *Boletín Sociedad Argentina de Botánica* 54 (Sup.): 94-95.
- Murace, M. A., Saparrat, M. C. N., Perelló, A. y Luna, M. L. (2022a) Duramen de *Robinia pseudoacacia* con evidencias de pudrición: agente causal y caracterización anatómica y química de la madera atacada. *Quebracho* 30 (1):18-30.
- Murace, M., Luna, M. L., Lucentini, G., Maly, L., Perelló, A. y Saparrat, M. C. N. (2022b). Pudrición blanca en duramen de ejemplares de *Melia azedarach* (Meliaceae) del arbolado urbano de La Plata (Buenos Aires): agente causal y caracterización químico-anatómica del leño atacado. *Lilloa* 59 (suplemento): 387-407.
- Otjen, L. y Blanchette, R. A. (1986). A discussion of microstructural changes in wood during decomposition by white rot basidiomycetes. *Canadian Journal of Botany* 64: 905-911.
- Otjen, L., Blanchette, R. A., Effland, M. y Leatham, G. (1987). Assessment of 30 white rot basidiomycetes for selective lignin degradation. *Holzforschung* 41: 343-349.
- Pandey, K. K. y Pitman, A. J. (2003). FTIR studies of the changes in wood chemistry following decay by brown-rot and white-rot fungi. *International Biodeterioration & Biodegradation* 52: 151-160.
- Pandey, K. K. y Pitman, A. J. (2004). Examination of the Lignin Content in a Softwood and a Hardwood Decayed by a Brown-Rot Fungus with the Acetyl Bromide Method and Fourier Transform Infrared Spectroscopy. *Journal of Polymer Science: Part A: Polymer Chemistry* (42): 2340-2346.
- Poletto, M., Ornaghi, H. L. Jr. y Zattera, A. J. (2014). Native Cellulose: Structure, characterization and thermal properties. *Materials* 7: 6105-6119.

- Qi, J., Li, F., Jia, L., Zhang, X., Deng, S., Luo, B., Zhou, Y., Fan, M. y Xia, Y. (2023). Fungal Selectivity and Biodegradation. Effects by White and Brown Rot Fungi for Wood Biomass Pretreatment. *Polymers* 15: 1957. <https://doi.org/10.3390/polym15081957>
- Rajchenberg, M. y Robledo, G. (2013). Pathogenic polypores in Argentina. *Forest Pathology* 43: 171-184.
- Rayner, A. D. M. y Boddy, L. (1988). *Fungal Decomposition of Wood: Its Biology and Ecology*. John Wiley and Sons, New York.
- Robles, C. A., Castro, M. A. y López, S. E. (2014). Wood decay by *Inonotus rickii* and *Bjerkandera adusta*: A micro- and ultra-structural approach. *IAWA Journal* 35 (1): 51-60.
- Rodríguez, L. (1978). *Métodos de Análisis empleados en la Industria papelería*. (1° Ed). Colombia.
- Rudakiya, D. M. y Gupte, A. (2019). Assessment of white rot fungus mediated hardwood degradation by FTIR spectroscopy and multivariate analysis. *Journal of Microbiological Methods* 157: 123-130. <https://doi.org/10.1016/j.mimet.2019.01.007>
- Saito, K., Watanabe, Y., Shirakawa, M., Matsushita, Y., Imai, T., Koike, T., Sano, Y., Funada, R., Fukazawa, K. y Fukushima, K. (2012). Direct mapping of morphological distribution of syringyl and guaiacyl lignin in the xylem of Maple by time-of-flight secondary ion mass spectrometry. *The Plant Journal* 69: 542-552.
- Saparrat, M. C. N., Estevez, J. M., Troncozo, M. I, Arambarri, A. y Balatti, P. (2010). In-vitro depolymerization of *Scutia buxifolia* leaf-litter by a dominant Ascomycota *Ciliochorella* sp. *International. Biodeterioration & Biodegradation* 64: 262-266.
- Schwarze, F. W. M. R. (2007). Review wood decay under the microscope. *Fungal Biology Reviews* 21: 133-170.
- Schwarze, F. W. M. R., Lonsdale, D. y Fink, S. (1997). An overview of wood degradation patterns and their implications for tree hazard assessment. *Arboricultural Journal* 21: 1-32.
- Schwarze, F. W. M. R., Engels, J. y Mattheck, C. (2000). *Fungal strategies of wood decay in trees*. Springer Verlag, Berlin.
- Shi, J., Xing, D. y Li, J. (2012). FTIR Studies of the Changes in Wood Chemistry from Wood Forming Tissue under Inclined Treatment. *Energy Procedia* 16: 758-762.
- Shigo, A. L. y Marx, H. G. (1977). *Compartmentalization of decay in trees*. USDA Forest Service, Agriculture Information Bulletin No. 405.
- Skyba, O., Douglas, C. J. y Mansfielda, S. D. (2013). Syringyl-rich lignin renders poplars more resistant to degradation by wood decay fungi. *Applied and Environmental Microbiology* 79 (8): 2560-2571.
- Srebotnik, E. y Messner, K. (1994). A simple method uses differential staining and light microscopy to assess the selectivity of wood delignification by white rot fungi. *Applied and Environmental Microbiology* 60 (4): 1383-1386.

- Toledo, A. V., Franco, M. E. E., López, S. M. Y., Troncozo, M. I., Saparrat M. C. N. y Balatti, P. A. (2017). Melanins in fungi: Types, localization and putative biological roles. *Physiological and Molecular Plant Pathology* 99: 2-6.
- Urcelay, C., Robledo, G., Heredia, F., Morera, G. y García Montaña, F. (2012). Hongos de la madera en el arbolado urbano de Córdoba. (1° Ed). Instituto Multidisciplinario de Biología Vegetal (UNC-CONICET).
- Van Heerden, A., le Roux, N. J., Swart, J., Gardner-Lubbe, S. y Botha, A. (2008). Assessment of wood degradation by *Pycnoporus sanguineus* when co-cultured with selected fungi. *World Journal of Microbiology and Biotechnology* 24: 2489-2497.
- Wilcox, W. W. (1993a). Comparative morphology of early stages of brown-rot wood decay. *IAWA Journal* 14 (2): 127-138.
- Wilcox, W. W. (1993b). Comparison of scanning electron microscopy and light microscopy for the diagnosis of early stages of brown rot decay. *IAWA Journal* 14 (3): 219-226.
- Zabel, R. A. y Morrell, J. J. (1992). Wood microbiology. Decay and its prevention. Academic Press Inc.