

Durabilidad natural y adquirida de madera de *E. grandis* proveniente de plantaciones de rápido crecimiento en Uruguay.

Böthig, S¹; Sánchez, A.¹; Doldán, J.²; Villamarín, B.²; Rava, B.²

asanchez@latu.org.uy.

¹Gerencia de Investigación, Desarrollo e Innovación. Laboratorio Tecnológico del Uruguay. Av. Italia 6201 / C.P. 11500. Montevideo, Uruguay.

²Departamento Materiales y Productos Forestales. Gerencia de Análisis y Ensayos. Laboratorio Tecnológico del Uruguay. Av. Italia 6201 / C.P. 11500. Montevideo, Uruguay.

RESUMEN

En Uruguay las principales especies forestales con destino de madera sólida son *Eucalyptus grandis*, *Pinus taeda* y *Pinus elliotii*, cuya durabilidad ha sido motivo de estudio en el Laboratorio Tecnológico del Uruguay (LATU). El objetivo de este trabajo es presentar información generada acerca de la durabilidad natural y adquirida de la madera nacional de *E. grandis* proveniente del litoral y noreste del país. Por su baja durabilidad se utilizó *Populus x euroamericana* cv I 214 y *Pinus* spp. como referencia. En el predio del LATU (-34,88° latitud S; 56,07° longitud W) perduran ensayos de campo con 9, 10 y 14 años (estacas enterradas y doble capa). En laboratorio se evaluaron duramen y madera impregnada con CCA-C (óxidos de cobre, cromo y arsénico), ACQ-D (cuprato de didecildimetilamonio) y CA-B (cuproazol) frente al deterioro por pudrición blanca, parda y blanda y termitas (*Reticulitermes flavipes*). El duramen de *E. grandis* resultó poco durable, más susceptible a pudriciones blanda y blanca; y susceptible al ataque de termitas. Esta información concuerda con resultados de campo. Las retenciones efectivas globales que protegieron del ataque de *Trametes versicolor*, *Gloeophyllum trabeum* fueron 3,0; 3,5 y 2,8 kg/m³ para CCA-C, CA-B y ACQ-D respectivamente. Los respectivos umbrales de eficacia, límite inferior y superior, que protegieron del ataque de termitas fueron (2,8; 3,2) (5,8; 7,3) y (7,1; 8,3) kg/m³. Si bien la madera tratada con 3,2 kg/m³ de CCA-C, mostró resistencia frente a hongos y termitas, retenciones por debajo de 12,7 kg /m³ no ofrecieron protección frente a pudrición blanda. En campo, estacas con 6,1 kg/m³ de CCA-C, presentaron a los 11 años un índice de condición medio 4 (ataque muy severo, AWP A7), con 75 % de fallas. La condición de exposición a la intemperie sin contacto con el suelo de madera preservada deberá ser evaluada en campo.

Palabras clave: protección de maderas, preservantes, *Eucalyptus* sp., CCA-C, CA-B, ACQ-D

1. INTRODUCCIÓN

Existe vasta información acerca de la durabilidad natural y adquirida de coníferas a nivel mundial pero no así en relación a latifoliadas y particularmente de *E. grandis*. Existe predominancia de diferentes agentes de deterioro según el grupo botánicos que se considere (Eriksson, *et al.*, 1990; Nuñez, 2009; Thornton *et al.*, 1989).

En Uruguay la madera de *Eucalyptus grandis* se destina a elaborar piezas aserradas o rollizas y productos de ingeniería utilizados en construcción, y para tendido eléctrico o uso rural. En su uso en la construcción está expuesto a diferentes condiciones y agentes de deterioro.

Estudios realizados por el LATU enfocados en caracterizar propiedades físico-mecánicas de la madera procedentes de plantaciones de rápido crecimiento (O'Neill, 2005 a, b) indican que el

duramen de *E. grandis* de hasta 18 años, no corresponde a madera adulta. El material de la posición cercana a médula es madera juvenil en su totalidad, mientras que la posición más alejada de la médula (cercana a la corteza) es madera de transición (Doldán y Böthig, 2002; Doldán 2003). Los estudios de durabilidad natural tanto en laboratorio como a campo se han llevado a cabo estableciendo ensayos indicados en la normativa europea (CEN) y americana (AWPA). Parte de esta información ha sido reportado en el trabajo de Böthig et al, (2008). También se instalaron ensayos de durabilidad de madera tratada con preservantes químicos a escala de laboratorio (CCA-C; CA-B y ACQ-D) y de estacas enterradas tratadas con CCA-C en campo, que siguen siendo evaluados.

En condiciones de uso exigentes con responsabilidad estructural es necesario impregnar con preservantes químicos o aplicar otras tecnologías alternativas como la modificación térmica o química (Schultz et al 2008; Dieste, 2012). En Uruguay el preservante más ampliamente aplicado es el CCA-C, compuesto por óxidos de cobre, cromo y arsénico en base acuosa. Debido a sus prestaciones de alta efectividad para un amplio espectro de condiciones, buena fijación, y gran persistencia, su simplicidad y bajo precio, el CCA-C es aún ampliamente utilizado para condiciones de exposición a la intemperie y contacto directo con el suelo o agua. Sin embargo también es creciente la intención de su sustitución dada el riesgo involucrado para el ambiente y salud de humanos y animales (Freeman, 2013). Existen varias alternativas al uso de este preservante entre las cuales se encuentran el ACQ-D, compuesto de cloruro de didecildimetilamonio y óxido de cobre, CA-B, perteneciente al grupo de azoles de cobre y compuesto por cobre y tebuconazol.

Si bien la industria nacional de la preservación dispone de información para buenas prácticas de uso del CCA-C (medidas preventivas de seguridad para el operario y correcto procedimiento de impregnación (DINAMA, 2007), no cuenta con una normativa nacional que establezca retenciones mínimas de CCA-C para una adecuada protección de la madera de *Eucalyptus grandis* y *Pinus* spp. Durante varios años se ha utilizado como documento base un acuerdo nacional de impregnadores que establece retenciones mínimas de acuerdo al uso y especie (DINAMA, 2007). Se requiere de información local como base de un sistema normativo local para el uso de la madera nacional en la construcción.

El objetivo de este trabajo es presentar lo más relevante de la información hasta el momento generada en el LATU acerca de la durabilidad natural y adquirida de la madera nacional de *E. grandis* proveniente del litoral y noreste del país. Se analiza la durabilidad en función de la procedencia de la madera (sitio de plantación) y del tipo de tejido (cercano a la médula y a la corteza). Asimismo, se presentan resultados de la resistencia de la madera tratada con los preservantes mencionados. Se proporciona adicionalmente información de madera nacional de álamo (*Populus deltoides x euroamericana cv I 214*) y de pino (*P. taeda*) como material de referencia para los ensayos.

2. MÉTODOS EXPERIMENTALES

2.1 Madera de *Eucalyptus grandis* Hill Ex Maiden.

El material estudiado provino de muestreos realizados en distintos momentos y varios sitios del país:

Durabilidad natural: plantaciones de 16 años ubicadas en el noreste y litoral del país (Sitio I, Rivera LS 31° 21' 15.79" - LO 55° 27' 31.34" y Sitio II, Río Negro, LS 32° 54' 41.67" LO 57°

58' 48.25"). En el ensayo de pudrición blanda se estudió madera proveniente del sitio I. Durabilidad adquirida: en ensayos de laboratorio se estudió madera el mismo material que en durabilidad natural. En ensayos de campo las estacas se confeccionaron con madera de plantaciones de 12 años proveniente de Rivera y de 16 años de Río Negro.

2.2 Madera de referencia

Se utilizó madera de álamo *Populus deltoides* (W. Bartram ex Marshall) x *euroamericana* cv I 214, categorizada como “no durable” (EN 350-2 (Van Acker *et al.* 2003) cultivado en el departamento de San José (sur del país), *Pinus taeda* Linnaeus y *Pinus elliottii* Engelmann, provenientes de plantaciones de entre 17 y 24 años. Para los ensayos de pudrición blanda se uso madera de plantaciones de *P. taeda* de Durazno (centro del país) LS 33° 14' 17.7- LO 56° 02' 08.7”

2.3 Impregnación de la madera.

En la Tabla 1 se presenta información de los preservantes estudiados: CCA-C, CA-B y ACQ-D. La concentración de elementos inorgánicos en la solución de impregnación y en aserrín de madera impregnada fue medida por espectrometría de fluorescencia de rayos X (equipos Shimadzu EDX 800 y Oxford X-Supreme) mientras que los componentes orgánicos fueron analizados por HPLC (Agilent 1100). Las técnicas analíticas aplicadas se basaron en las normas AWWA A9, A37 y A28.

Tabla 1. Preservantes evaluados.

Preservante	Ingrediente	Concentración [%]
CCA-C	Ácido crómico (CrO ₃)	28,5
	Pentóxido de arsénico (As ₂ O ₅)	20,4
	Oxido cúprico (CuO)	11,1
CA-B	Carbonato de cobre	16,1
	Tebuconazol	2,0
	Etanolaminas	--
ACQ-D	Componente 1	
	Óxido cúprico (CuO)	15
	2-aminoetanol	50
	Componente 2	
	Cloruro de N,N-didecil-N,N-dimetilamonio (DDAC)	80
	Alcohol etílico	10

La impregnación se realizó en autoclave de laboratorio siguiendo método de Bethel (ciclos sucesivos de vacío, presión y vacío). Las variables de proceso fueron ajustadas de acuerdo a la especie. La etapa posterior de fijación del preservante se realizó en estufa a 55°C durante 48h.

2.4 Ensayos.

El diseño de los ensayos se basó en las normativas EN350-1 y 2 y EN599-1, UNE-EN 460, AWWA U1 contemplándose los agentes y condiciones que se establecen en dicha normativa de acuerdo a los posibles usos de la madera y condiciones de riesgo de exposición (Tablas 3 y 4).

Se realizaron ensayos acelerados en laboratorio y de campo, simulando condición de contacto directo y proximidad de suelo (Tabla 3). Previo a la instalación de los ensayos, la madera se

acondicionó en cámara climatizada (20°C de temperatura y 65% de humedad) determinándose peso anhidro y densidad.

Análisis de datos. Para realizar el análisis estadístico de los datos (ajustes de distribución, correlaciones, análisis de varianza y comparación de medias), se utilizó software estadístico Infesta. Se analizó la influencia del sitio (I y II) y el tipo de tejido leñoso, madera juvenil (A) y de transición (C) en la durabilidad natural.

En durabilidad adquirida se estudió el efecto del tratamiento de preservante mediante análisis de varianza y comparación de medias para determinar retención efectiva y regresiones lineales para determinar asociaciones con el desempeño del preservante en distintos tiempos de evaluación.

Tabla 3. Cepas empleadas de hongos basidiomicetes especificados por la norma EN 113.

Durabilidad adquirida	Durabilidad natural	Tipo de pudrición	Madera ensayada
<i>Trametes versicolor</i> (L.:Fr.) Quél. (ATCC 12679, BAM CTB863A)	<i>T. versicolor</i> (ATCC 12679),	Blanca	<i>E. grandis</i>
<i>Gloeophyllum trabeum</i> (Pers.) Murrill (ATCC11539, BAM Ebw109)1	<i>G. trabeum</i> (ATCC11539) <i>Serpula lacrymans</i> (Wulfen:Fr.) BAM Ebw315	Parda	
<i>T. versicolor</i> (ATCC 12679, BAM CTB863A)	–	Blanca	<i>P. taeda</i>
<i>G. trabeum</i> , (BAM Ebw109, ATCC11539) <i>Postia placenta</i> (Fr.) Larsen & Lombard (BAM FPRL 28)	–	Parda	
<i>Coniophora puteana</i> (Shum.: Fr.) P.Karst(ATCC36336)	–	Parda	

Tabla 4. Resumen de condiciones experimentales.

Condiciones ambientales	Tipo de exposición/ posición de probetas	Dimensión probetas [mm]	Norma/Método	Ensayos
T=(28± 1)°C HR=(70± 5)%	enterrada/horizontal	3 x 14 x 150	AWPA E23-13	Pudrición blanda
Intemperie, no controladas	enterrada/vertical	25 x 50 x 500 30 x 30 x 400	AWPA E7-13 EN 252	Estacas enterradas (durabilidad adquirida y natural)
Intemperie, no controladas	Proximidad al suelo/horizontal	25 x 50 x 500	AWPAE25 (2013)	Doble capa
T=(22±2)°C HR=(70±5)%	En contacto con agente	25 x 15 x 50	EN 113 (1980)	Deterioro por hongos basidiomicetes
T=(26 ±2)°C HR=(70±5)%		40 x 10 x 100	EN118 (1992) Madera sin tratar	Resistencia frente a termites <i>Reticulitermes flavipes</i>
		25 x 15 x 50	EN117 (1980) madera preservada)	(<i>Rhinotermitidae</i>)

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

3.1 Durabilidad natural.

3.1.1 Ensayos de laboratorio.

3.1.1.1. Resistencia al deterioro por hongos basidiomicetes.

La resistencia a la pudrición demostró diferencias según la posición del leño con respecto a la medula. En relación a la pudrición parda (*G. trabeum*), la madera juvenil (posición A) resultó desde “moderadamente durable” a “durable”, mientras que la madera de transición (posición C) se comportó como “durable” (Böthig *et al.* 2008) de acuerdo a la clasificación de EN 350-1. En cuanto a la pudrición fibrosa (*T. versicolor*), la madera juvenil resultó “poco durable”, mientras que la de transición “moderadamente durable”. En forma global la madera juvenil se comportó como “poco durable” mientras que la de transición como “medianamente durable”.

No se encontró efecto de sitio, no se establecieron diferencias significativas entre ambos orígenes de la madera, tanto en el deterioro por *T. versicolor* ($P(T \leq t)_{\text{dos colas}}=0,34, \alpha=0.05$), como por *G. trabeum* ($P(T \leq t)_{\text{dos colas}}=0,06, \alpha=0.05$).

La albura se desempeñó como “no durable” frente a *T. versicolor* y de “durable” a “muy durable”, dato se originado de pocas réplicas validadas y con alta dispersión (CV 75%). *P. deltoides cv I 214* frente a *G. trabeum* tuvo gran variación en pérdidas de peso, lo que limitó el número de ensayos validados. Se emplearon cepas de diferente origen y distintos métodos de revitalización de inóculo. El mismo comportamiento se presentó frente a *Serpula lacrymans*.

Tabla 4. Pérdidas de masa e Índice de durabilidad (Pérdida de masa relativa *E. grandis*/*P. deltoides cv I 214*) de acuerdo al sitio y tipo de leño, obtenidos para *G. trabeum* y *T. versicolor* (EN 113).

Pérdida de masa <i>E. grandis</i> [%]		Pérdida masa <i>P. deltoides cv. I214</i> [%]		Índice de durabilidad		Hongo ensayado	Sitio
C	A	C	A	C	A		
19,6	24,3	43,6	34,7	0,4*	0,7	<i>T. versicolor</i>	I Duramen
24,6	47,8	48,3	35,8	0,6**	0,7	<i>T. versicolor</i>	II Duramen
6,0	7,23	29,9	30,2	0,2***	0,3	<i>G. trabeum</i>	I Duramen
5,0	10,4	28,0	29,0	0,2****	0,4	<i>G. trabeum</i>	II Duramen
37,5				1,0		<i>T. versicolor</i>	- Albura
0,52				0,02		<i>G. trabeum</i>	Albura

¹*Medias estadísticamente diferentes $P(T \leq t)_{\text{dos colas}}=0,02$. **Medias estadísticamente diferentes $P(T \leq t)_{\text{dos colas}}=0,04$. ***Medias estadísticamente iguales $P(T \leq t)_{\text{dos colas}}=0,27, n=12$. **** Medias estadísticamente diferentes $P(T \leq t)_{\text{dos colas}}=0,035$.

3.1.1.2. Resistencia frente a termites

El duramen de *E. grandis* resultó “sensible” a termites según EN350-1, obteniéndose un rango de clasificación de los daños entre 2 y 4 y un valor medio de 3,6. La procedencia de la madera no influyó en el grado de ataque así como tampoco el tipo de leño (juvenil o transición) (Böthig *et al.*, 2008).

La albura de *E. grandis* también fue clasificada como “sensible” a este agente.

3.1.1.3. Resistencia a hongos de pudrición blanda.

El duramen y la albura de *E. grandis* fueron clasificados como “no durable” frente al ataque de hongos de pudrición blanda. Debido a que la norma AWPA23 y la EN350-1 no establecen criterios de clasificación frente a este deterioro, se asumieron los especificados para hongos basidiomicetes en la EN350-1, sustituyendo la pérdida relativa de masa por la disminución relativa de MOE. La norma ENV 807, que también evalúa pudrición blanda, establece la evaluación a las 32 semanas de ensayo. Sin embargo en la fase inicial del ensayo se observó alta incidencia del error del método de evaluación (Fig.1) por lo que se evaluó el cociente a lo largo de todo el ensayo y se calculó su promedio (Índice de durabilidad, Tabla 5). Se observa en la Fig. 1, una evolución similar en la pérdida de resistencia del duramen y el pino.

Tabla 5. Índice de durabilidad (pérdida de MOE relativa *E.g/ P.t* promedio), Pérdida porcentual de MOE a las 82 semanas y MOE inicial

Índice de durabilidad (desviación estándar)	Pérdida de MOE a 82 se manas [%]	MOE inicial [MPa]	
1	68	2994	<i>P. taeda</i>
0,96 (0,25)	73	5727	Duramen <i>E. grandis</i>
1,4 (2,3)	100	5395	Albura <i>E. grandis</i>

Luego de 19 meses (82 semanas) de ensayo se constató 100% de fallas en la albura, 44% en duramen y 33% en pino (Fig. 1). A los 22 meses las pérdidas de masa promedio de las probetas falladas fueron de 25,8%, 21,9% y 19,3% respectivamente.

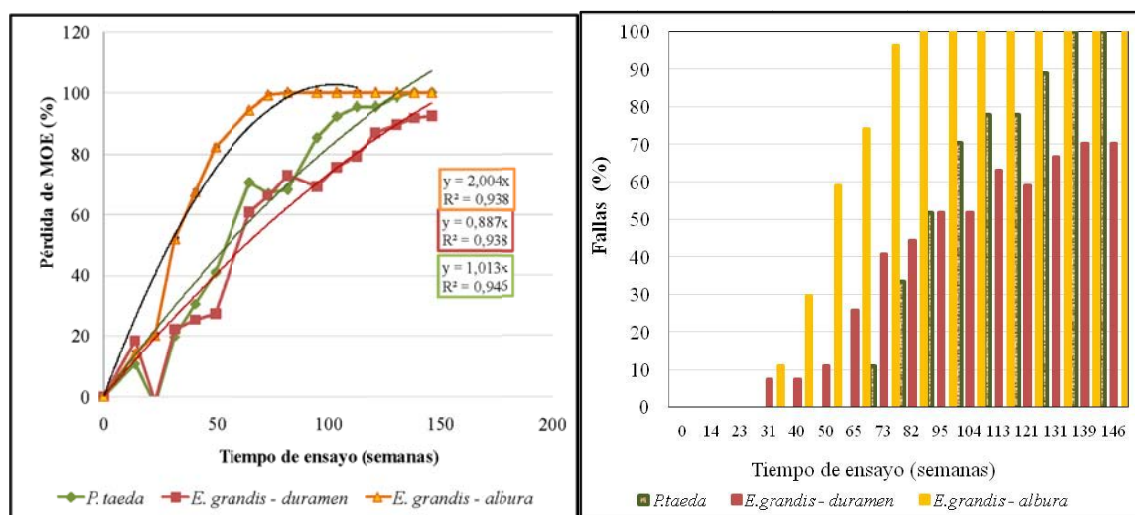


Figura 1. Pérdida de módulo de elasticidad de las probetas de ensayo (izquierda) y fracción de probetas falladas (derecha) a lo largo del ensayo

Al final del ensayo, cuando todas las estacas hayan fallado, se podría determinar la relación de la duración promedio de las estacas en relación a los controles y aplicar el criterio de categorización establecido por la EN350-1. Este parámetro está relacionado con la destrucción total de la madera (falla) y se calcula al fin del ensayo, mientras que la disminución de resistencia (pérdida de MOE) proporciona información cuantitativa anticipada y se puede vincular a condiciones de seguridad para el uso. Ambas alternativas serían válidas y complementarias para determinar susceptibilidad.

3.2 Ensayos de campo

3.2.1. Estacas enterradas.

A los 112 meses, momento de la última evaluación, quedaban en terreno el 4 % de las estacas de *E. grandis*, mientras que el grupo de control (*P. deltoides* cv I214) a los 78 meses (6 años) había fallado en su totalidad.

El cálculo de duración relativa promedio (EN350) no se puede realizar hasta el fin del ensayo, sin embargo se estimó asumiendo 112 meses de duración para las probetas que permanecen en pie, ya que su condición está cercana a falla. De esta forma, se obtuvieron para este índice valores entre 1,8 y 2,1 calificando a esta especie como “poco durable” a “moderadamente durable” en contacto directo con el suelo (Tabla 6).

Cuffré et.al (2010) mencionan resultados preliminares similares al evaluar durabilidad natural de *E. grandis* a campo en un ensayo de un año en Argentina y según la clasificación de la norma EN350-1. El material utilizado fue duramen interno, duramen externo y albura de árboles entre 11 y 27 años. Los mismos autores muestran que en ensayos de campo según norma EN 252 en 4 sitios diferentes ubicados en España y Alemania a los 4 años de instalados el duramen y madera juvenil de *E. grandis* ya presentaban categorías de daño promedio de 1,5 a 4.

El sitio posee en general condiciones favorables al biodeterioro. De acuerdo al régimen de precipitaciones y a la temperatura media mensual desde 2002 a 2013 (INIA, 2016), el índice de Scheffer promedio correspondió 47, indicando riesgo de deterioro alto (Lebow, y Highley, 2008; AWPA U-13).

Tabla 6. Vida media de estacas enterradas por especie y relación *E.g/P.d* durante 112 meses de ensayo.

<i>P. deltoides</i> cv. I214	<i>E. grandis</i>				
	C Sitio I	A sitio II	C Sitio I	A Sitio I	
35,2	73	70	66	64	Promedio [mes]
17,4	24	44	32	32	Mínimo [mes]
69,2	112	112	112	90	Máximo [mes]
	2,0	2,1	1,9	1,8	Relación <i>E.g/P.d</i>

Los índices de condición a los 112 meses para los sitios I y II representan daño por hongos muy severo: 4,0 y 3,9 (EN 252) con medias estadísticamente iguales ($(P(T \leq t)_{\text{dos colas}} = 0,11, \alpha = 0,05$; Tabla 7).

También se calcularon los índices de condición medio del deterioro por la norma AWPA7 que muestra la misma tendencia que con la norma EN252 (Tabla 7). No se detectaron diferencias entre sitios ($(P(T \leq t)_{\text{dos colas}} = 0,12 \alpha = 0,05$), ni por posición en la troza para ambos sitios (A vs. C)

$(P(T \leq t)_{\text{dos colas}} = 0,9 \text{ y } 0,5 \alpha = 0,05)$.

En paralelo se evaluó de acuerdo a la norma AWP A7, cuya escala para calificar el daño es más amplia que la europea, y así reflejar evolución del mismo. Asimismo, la evaluación acorde a ambas escalas facilita comparación con otros resultados.

Tabla 7. Índice de condición media, mínimos y máximos de calificaciones para el ensayo de estacas enterradas luego de 112 meses de instalado (EN252 y AWP A7).

	Daño por termitas		Daño por hongos		Daño por termitas		Daño por hongos		Sitio	
	AWPA E7				EN252					
	C	A	C	A	C	A	C	A		
<i>E. grandis</i>	3,8	0	0,13	0	0,4	0,3	4,0	3,9	I	Promedio
	7,0	0	6,0	0	4,0	3,0	4,0	4,0		Máximo
	0	0	0	0	0	0	3,0	3,0		Mínimo
	3,6	2,0	0,4	0	0,3	0,7	3,9	3,8	II	Promedio
	8,0	6,0	6,0	0	3,0	4,0	4,0	4,0		Máximo
	0	0	0	0	0	0	3,0	2,0		Mínimo
<i>P. deltooides</i> cv I214	0		0		0		4,0		--	Promedio

A partir de los 33 meses se observó ataque de termitas madera de ambos sitios.

El índice de condición a los 112 meses para los sitios I y II fue 0,3 y 0,5 (EN252) (medias estadísticamente iguales $P(T \leq t)_{\text{dos colas}} = 0,37$) (Tabla 7). Sin embargo, con niveles de deterioro muy dispares, desde ausencia de ataque, hasta falla por termitas para ambas especies este índice no refleja la condición general. Cuffré *et.al* (2010) reportan que en 2 de los 4 sitios en Europa, al cuarto año de instalados se detectó la presencia de termitas.

Los resultados de los ensayos de laboratorio y de campo muestran que la prevalencia de la pudrición marrón fue muy baja frente a la pudrición blanca tanto en la madera juvenil y de transición de *E. grandis*, como para la madera de *P. deltooides* cv. I214; pudrición cúbica menor a 10 % y pudrición blanca mayor a 90% en ambos casos. Thornton *et al.* (1989) reportaron también predominancia de pudrición fibrosa, al evaluar la durabilidad natural de mirtáceas particularmente de algunos eucaliptos y otras géneros nativos de Australia través de ensayos de estacas de hasta 20 años.

3.2.2 Doble capa

En este ensayo pudo observarse que tanto para la madera de *P. deltooides* cv. I214 como de *E. grandis* el grado de deterioro por hongos y termitas alcanzado fue visiblemente menor que las estacas enterradas debido a que no hay contacto directo con el suelo. Al momento de la última evaluación no se registraron fallas de la especie estudiada, por lo que no se puede analizar la duración relativa promedio y por lo tanto clasificar su durabilidad.

A los 122 meses de instalado, el índice de condición de los grupos de la madera proveniente del sitio I, varió en un rango de 3,9 a 5, mientras que los del sitio II entre 5,8 y 7,6 (AWPA, E25).

Si bien se constataron diferencias significativas entre los sitios ($P(T \leq t)_{\text{dos colas}} = 3,0 \times 10^{-11}$; $\alpha = 0,05$)

siendo más susceptible el sitio I, debe tenerse en cuenta que el diseño del experimento posiblemente sesgó el resultado, ya que todas las probetas de álamo con alta susceptibilidad fueron ubicadas contiguas a las del sitio I favoreciendo la propagación del inóculo.

La norma AWWA E25 considera afectación superficial preferentemente y teniendo en consideración la disposición de las probetas en el ensayo, se entendió que esta última modalidad permite prever el daño con mayor sensibilidad. En contrapartida, por este mismo motivo este sistema de calificación no se puede interpretar como una estimación de la pérdida de resistencia mecánica. En cambio los sistemas de evaluación de las normas EN 252 y AWWA 7 hacen referencia a daños a nivel de la sección transversal que implican disminución de resistencia. Las categorizaciones de acuerdo a la EN 252 no reflejan diferencias significativas entre sitios en relación a hongos ($P(T \leq t)_{\text{dos colas}} = 0,98$, $\alpha = 0,05$) (Tabla 8).

Tabla 8. Índice de condición para daño por hongos y termites a los 122 meses de ensayo (EN252).

<i>P. deltooides</i> <i>cv I214</i>	Termites		Hongos			
	<i>E. grandis</i>		<i>E. grandis</i>			
	Sitios		Sitios			
	II	I	<i>P. deltooides</i> <i>cv I214</i>	II	I	
0	0,4	0,6	3,7	2,3	2,3	Promedio
0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	Mínimo
0	2,0	2,0	4,0	4,0	4,0	Máximo
-	0,7	0,63	1,0	0,84	0,81	Desviación estándar

El deterioro fue mayor en la capa inferior donde queda atrapada la humedad, presentando una calificación cercana a 4 para ambos sitios, mientras que la superior 6 ($P(T \leq t)_{\text{dos colas}} = 4,7 \times 10^{-5}$; $\alpha = 0,05$). No se evidenciaron diferencias de deterioro en relación a la posición relativa a la médula, A y C ($P(T \leq t)_{\text{dos colas}} = 0,11$ para el Sitio I y $P(T \leq t)_{\text{dos colas}} = 0,14$ para el sitio II). En este ensayo sólo se detectó pudrición blanca en *E. grandis* mientras que en álamo coexistieron los tres tipos de deterioro fúngico, blanca, parda y blanda.

A los 84 meses fueron detectados daño y rastros de termites. Como es esperado para este agente de deterioro, existen factores aleatorio y espacial que condicionan su aparición y propagación por el ensayo, por lo que no es posible hacer una comparación de medias entre sitios o tipo de leño.

3.3 Durabilidad adquirida.

3.3.1 Ensayos de laboratorio.

Las retenciones efectivas globales que protegieron la madera estudiada del ataque de *T. versicolor*, y *G. trabeum* fueron 3,0; 3,5 y 2,8 kg/m³ para CCA-C, CA-B y ACQ-D respectivamente (Tabla 9).

Tabla 9. Retenciones efectivas globales de ACQ-D, CA-B y CCA-C que protegen de la degradación por basidiomicetes (EN113) en madera impregnada de *E. grandis* y de *P. taeda*.

<i>P. taeda</i>			<i>E. grandis</i>			Preservantes
ACQ-D	CA-B	CCA-C	ACQ-D	CA-B	CCA-C	
Retenciones efectivas (kg/m ³)						Basidiomicetes
4,2	3,5	4,0	2,7	2,7	3,0	<i>T. versicolor</i>
2,0	3,5	3,5	2,8	3,5	2,9	<i>G. trabeum</i>
9,1	4,9	6,1	-	-	-	<i>P. placenta</i>
6,3	3,4	4,1	-	-	-	<i>C. puteana</i>
9,1	4,9	6,1	2,8	3,5	3,0	Global (kg/m ³)

El “Documento de Normativa Común maderas preservadas con CCA-C en Uruguay” recomienda impregnar madera de *E. grandis* en contacto con el suelo sin y con responsabilidad estructural con retenciones mínimas de 8,0 y 11, 0 kg/m³ de retención y 100% de penetración en la albura. De acuerdo a estos resultados, esas retenciones protegerían la madera de esta especie de los agentes estudiados.

El límite global de toxicidad de cada preservante para pino fue el determinado para *Postia placenta*, hongo de pudrición parda que requirió más concentración de preservante, hecho que puede atribuirse a la tolerancia al cobre de *P. placenta* (Köse y Kartal, 2010). Los límites de toxicidad obtenidos para CCA-C, CA-B y ACQ-D fueron 6,1 kg/m³, 4,9 kg/m³ y 9,1 kg/m³ respectivamente (Tabla 9).

De acuerdo a la norma AWWA U1-13 las retenciones mínimas recomendadas de CCA-C para madera de “Southern Yellow Pine” (SYP, grupo que incluye a las especies *P. elliotii* y *P. taeda*) en condiciones de contacto con el suelo son: 6,4kg/m³ para la categoría UC4 A (componentes no críticos en contacto con suelo o agua dulce) y 9,6 kg/m³ para las categorías UC4B (componentes críticos estructurales en contacto con suelo o condiciones de riesgo alto para biodeterioro) y UC4C (componentes críticos en zonas de severo riesgo). Estas retenciones aseguran resistencia de la madera de *P.taeda* estudiada a las especies de hongos descomponedores especificados en la norma aplicada.

Las retenciones especificadas por la norma referida son 3,3 kg/m³, 5,0 kg/m³ y 9,6 kg/m³ para CA-B. Para la clase UC4B, la retención establecida es menor que el límite de toxicidad de 4,9kg/m³ hallado en este trabajo. Este valor parece mostrar necesidad de incrementar especificación.

En el caso de ACQ-D se establece 4,0 kg/m³, 6,4 kg/m³ y 9,6 kg/m³ como requerimientos para las categorías mencionadas. Sin embargo, de acuerdo a los resultados obtenidos con retenciones menores a 9,1 kg/m³ no se obtiene protección para los agentes estudiados.

3.3.2 Resistencia al deterioro por termitas

Los umbrales de eficacia, límite inferior y superior, que protegieron a *E. grandis* del ataque de termitas fueron (2,8; 3,2), (5,8; 7,3) y (7,1; 8,3) kg/m³ para CCA-C, CA-B y ACQ-D respectivamente, mientras que para *P.taeda* se necesitarían retenciones mayores a 6,6; 6,2 y 7,8 kg/m³ respectivamente.

Para proteger contra el ataque de termitas se requerirían retenciones mayores que contra hongos en madera preservada con CAB y ACQ-D.

El comportamiento en *P. taeda* resulto errático no pudiéndose establecer un límite superior, en

todos los preservantes. El ensayo de resistencia a *R. flavipes* fue diseñado en función de retenciones especificadas en AWPA U1 para la clase 2, sin embargo los resultados muestran que no fueron suficientes las máximas retenciones estudiadas.

3.3.3 Resistencia a hongos de pudrición blanda

La pérdida porcentual de MOE indica que los promedios de los tratamientos hasta 8kg/m³ fueron iguales al testigo, mientras que retenciones de 12,7 16,0 y 19,8 tuvieron comportamiento diferente, con menor pérdida de resistencia hasta las 111 semanas de ensayo (Figura 2), confirmado a través de la comparación de medias de Tukey (Tabla 10). Así mismo se verifica que los únicos grupos que aún no presentan fallas son las retenciones 12,7, 16,0 y 19,8 kg/m³; el grupo 8,0 kg/m³ ya presenta más de un 20%, mientras que los controles sin tratar y el grupo de 4,0 kg/m³ superan el 70% de fallas.

Este comportamiento diferencial podría deberse a la presencia de extractivos del tipo taninos y flavonoides generando complejos, que precipitan dentro de la madera. Como consecuencia la cantidad fijado en la celulosa y lignina disminuye, (Jansen, *et al.*,1985; Pizzi *et al.*, 1986; Eriksson, *et al.*, 1990).

Tabla 10. Comparación de pérdidas de MOE (%) para las diferentes retenciones y el control a los 24 meses de ensayo (Izq.) .n=número de réplicas

N	Medias*	CCA-C (kg/m ³)
9	52.94 ^a	19,8
9	62.95	16,0
9	68.36 ^a	12,7
9	87.32 ^b	8,0
9	95.36 ^b	<i>P. taeda</i> (control)
9	97,30 ^b	4,0
26	100 ^b	0,0

*Medias seguidas de una misma letra no difieren estadísticamente.
Test de Tukey ($\alpha=0.05$, DMS=15.2)

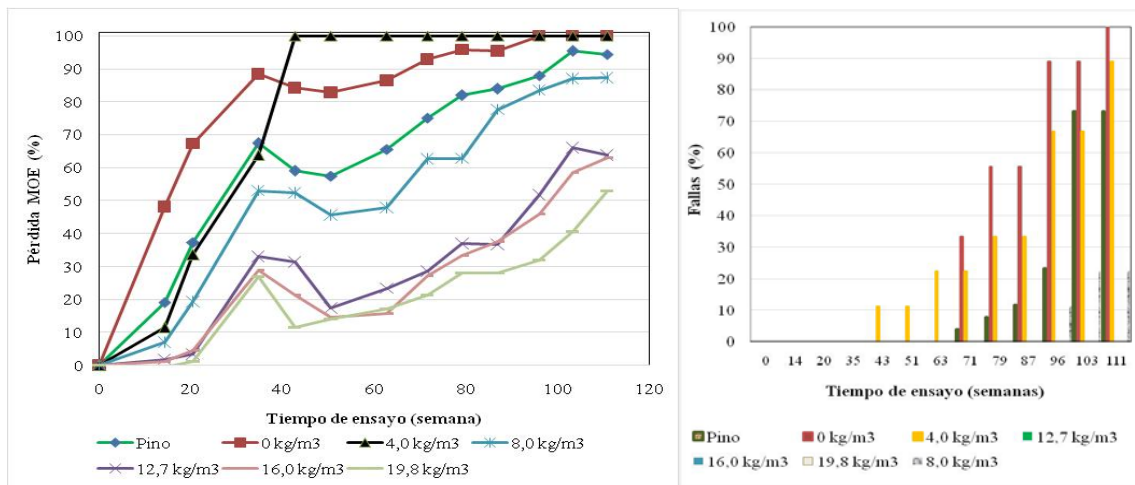


Figura 2. Pérdida de módulo de elasticidad de las probetas de ensayo (izquierda) y Fracción de probetas falladas (derecha) a lo largo del ensayo de pudrición blanda.

De acuerdo a los resultados de este trabajo, es evidente que por debajo de 12,7 kg/m³ es insuficiente la protección. Sin embargo las medias de pérdida de MOE a los 24 meses de ensayo (Tabla 10) son mayores a un 50% para todas las retenciones estudiadas. Estos resultados preliminares sugieren incorporar mayores retenciones y madera de *P.taeda* tratada con CCA-C al estudio.

Se deduce que la mínima retención efectiva frente a pudrición blanda para estas condiciones y tiempo de ensayo es superior a lo recomendado por el “Documento de Normativa Común maderas preservadas con CCA-C en Uruguay”, de 8,0 y 11, 0 kg/m³ de retención para madera en contacto con el suelo sin y con responsabilidad estructural.

En relación a la metodología se observó una mayor aproximación a la realidad por parte de la evaluación de MOE, que la calificación visual. Mientras que visualmente a las 50 semanas de los niveles de 12,7 kg/m³, 16,0 kg/m³, y 19,8 kg/m³ no evidencian deterioro, los valores de MOE comienzan a disminuir entre 10 y 20%. Esto muestra que para este ensayo el comienzo de la pérdida de resistencia mecánica, fundamental en el desempeño, solamente se detecta con su evaluación objetiva.

3.4 Ensayo de campo.

3.4.1 Estacas enterradas impregnadas con CCA-C.

La impregnación de *E. grandis* tuvo muy alta dispersión en las retenciones logradas, distribuidas en forma continua, no lográndose formar grupos con una retención definida y límites claros. El número de especímenes fue diferente para cada clase. Las estacas de *P.elliottii* y *P.taeda* se comportaron estadísticamente iguales por lo que los resultados se presentan como correspondientes a *Pinus* spp,

La primera falla de estacas de control de *Pinus* spp.y *E. grandis* ocurrió a los 18,6 meses (aproximadamente 1.5 años).Sin embargo la vida media de los controles fue de 49 y 56 meses respectivamente. López *et al.* (1985) reportaron tiempos de vida media de 8 meses para *P.elliottii*, en Brasil, mientras que Freeman (2013) reportó datos de vida útil de controles de SYP) en varios sitios en Mississippi entre 2,3 y 3,2 años. López *et al.* (1985) registraron vida útil de 42 meses para los controles de *E.saligna*, en Brasil. Presencia inevitable de duramen las probetas de ensayo pudo haber prolongado la vida media.

3.4.1.1. Análisis del efecto protector del CCA-C.

En campo, estacas de *E.grandis* con 6,1 kg/m³ de CCA-C, presentaron a los 11 años un índice de condición medio 4 (ataque muy severo, AWPA E7-07, Figura 3), con 75 % de fallas.

Morris y Cook (1990) y otros autores interpretan el valor del índice de condición necesario para los diferentes aplicaciones de la madera. Por ejemplo, un índice de condición mayor o igual a 7 se traduce en buen desempeño en uso estructural. Mientras que valores de 8 representan los primeros indicios aparentes de deterioro, valores menores a 7 implican necesidad de reposición.

En relación al ataque por hongos, se aprecia que ninguna de las retenciones utilizadas para *E. grandis* fue eficaz para conservar su resistencia estructural a los 137 meses (11 años y 4 meses).A los 5 años de ensayo el grupo de retención de 6,1 kg/m³ ya tenía condición por debajo de 7 (Fig. 5).

En contraposición, la madera de pino llegó a los 137 meses con calificaciones medias mayores o iguales a 7,5 para todas las retenciones mayores o iguales a 6,8 (figura 3). Aún para las

retenciones más bajas, por lo menos la mitad de las estacas se conservan adecuadamente. Estos resultados confirmarían la adecuación de $6,8 \text{ kg/m}^3$ para madera en contacto con suelo (AWPA U1:08) del mismo modo que Lebow *et al.* (2010) reafirmaron en su revisión el requisito de $6,4 \text{ kg/m}^3$.

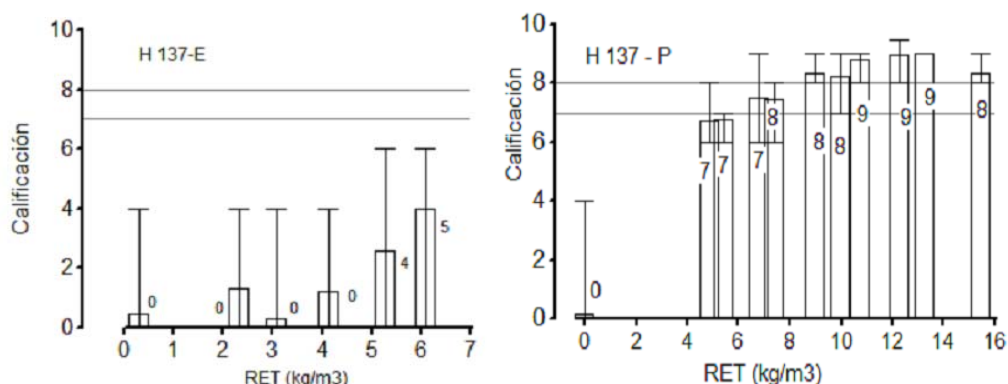


Figura 3. Índice de condición del daño por hongos por clase de retención a los 137 meses. RET: retención media; H: hongos; P: *Pinussp.*; E: *E. grandis*(medianas y los valores extremos en cada barra).

La condición de ambos géneros en relación al daño por termites fue mejor que respecto a la pudrición. Todas las retenciones presentaron medias y medianas mayores a 8 (Fig. 4). Este comportamiento podría explicarse por factores que interactúan entre sí, como el suficiente efecto insecticida del preservante para todas las retenciones estudiadas, el efecto competitivo de los hongos descomponedores (la madera se descompone antes de aparecer termites) y las perturbaciones de la colonización causadas por las evaluaciones periódicas. Por otra parte, como se constató en laboratorio (EN 117) que para *E.grandis* $3,0 \text{ kg/m}^3$ sería suficiente protección frente al daño por termites *R. flavipes*, mientras que para *P. taeda* el umbral de eficacia sería mayor a $6,4 \text{ kg/m}^3$.

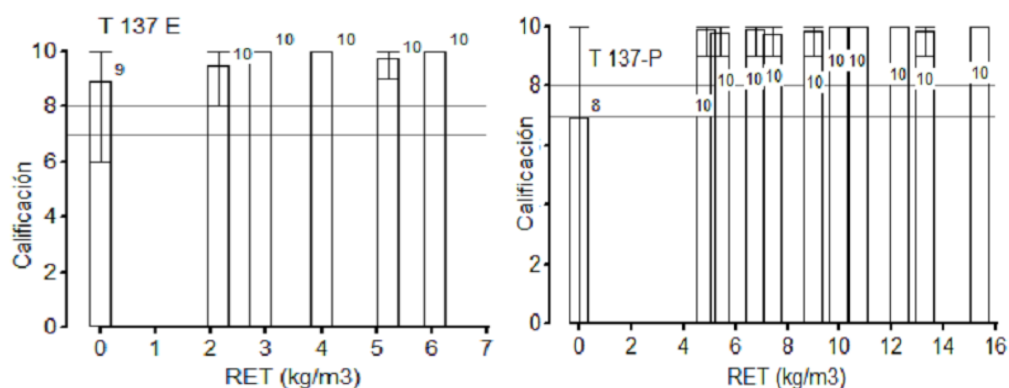


Figura 4. Índice de condición del daño por hongos por clase de retención a los 137 meses. RET: retención media; T: termites; P: *Pinussp.*; E: *E. grandis* Se indican las medianas y los valores extremos en cada barra.

La evolución de las calificaciones medias de las clases muestra claramente la insuficiencia de protección de CCA-C para *E. grandis* comparando con la obtenida para *Pinus spp.* (Fig. 5). Para *E.grandis* se encontró asociación positiva significativa entre la retención (Ret) y la calificación, sólo a los 89 y 137 meses. Para estos momentos se encontraron correlaciones significativas en modelos de regresión lineales en relación a Ret ($p \text{ valor}_{89}=0,0207$ y $p \text{ valor}_{137}=0,0031$) y a LnRet

(p valor₈₉=0,0689) y p valor₁₃₇=0,0036).

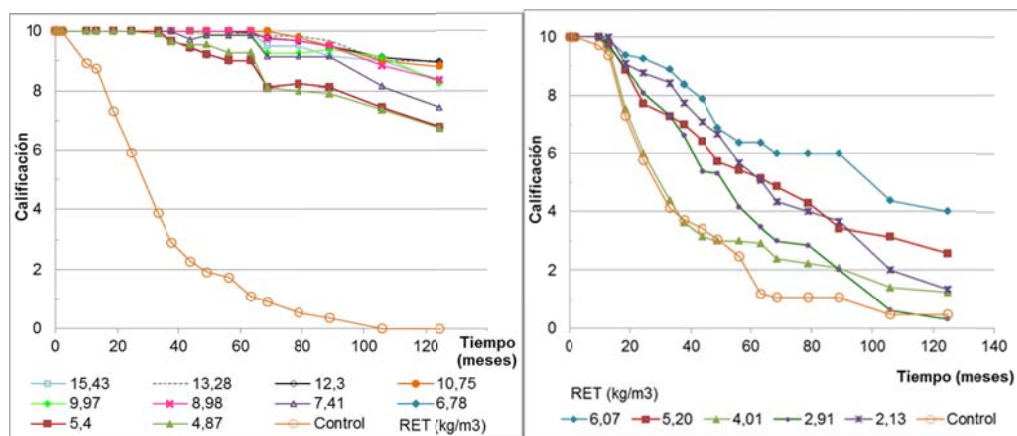


Figura 5. Evolución de índice de condición por hongos para *Pinus* spp.. (izq) y *E. grandis* (der) durante el transcurso del ensayo.

Tanto para *Pinus* spp. como para *E. grandis* se observa a que a tiempos mayores, o sea con mayor grado de deterioro, la calificación de las estacas está estadísticamente más asociada a la retención de preservante (Fig. 5). Se esperaría una mayor correlación entre la respuesta (calificación) y la dosis (retención) con mayor amplitud de rango de impregnación.

4. CONCLUSIONES

- El duramen de *E. grandis* proveniente de plantaciones de 16 años de Uruguay se clasificó como:
 - “moderadamente durable” a “poco durable” frente a hongos basidiomicetes en laboratorio y en campo
 - “poco durable” frente a hongos de pudrición blanda
 - “sensible” frente al ataque de termites *Reticulitermes flavipes*
- En general no se detectaron diferencias en la durabilidad de madera proveniente de distintos sitios, pero se detectó una susceptibilidad mayor de la madera juvenil a hongos basidiomicetes.
- La madera de *E. grandis* presentó menor susceptibilidad a pudrición cúbica que a pudrición blanca.
- La baja durabilidad de esta especie hace imprescindible que se utilice en forma rolliza e impregnada con preservantes para ser expuesta a la intemperie, enterrada o sobre el suelo.
- Madera de *E. grandis* tratado con CCA-C:
 - En condiciones de laboratorio son suficientes las retenciones 3,2 kg/m³ de para detener el deterioro de hongos basidiomicetes y de termites.
 - Sin embargo estacas impregnadas con retenciones de hasta 6,1 kg/m³ no superaron los 5 años en campo con integridad estructural (calificación mayor a 7).
 - Retenciones hasta 8 kg/m³ fueron ineficaces frente a pudrición blanda en laboratorio

- Retenciones de 12,7 a 19,8 kg/m³ presentaron mejor desempeño, pero no pareció suficiente para lograr protección frente a pudrición blanda en las condiciones de este estudio
- Se verificará desempeño evaluando mayores niveles de impregnación y especímenes de pino a las mismas retenciones
- Madera de *E.grandis* tratado con ACQ-D y CA-B:
 - Una retención de 2,8 kg/m³ de ACQ-D fue efectiva frente a los basidiomicetes estudiados mientras que se determinó un umbral de eficacia de 7,1-8,3 kg/m³ frente a termites.
 - En el caso del CA-B, mientras que 3,5 kg/m³ protegió a *esta especie* de los basidiomicetes estudiados, el umbral de eficacia hallado fue de 5,8 a 7,3kg/m³ frente a termites.
 - Las termites fueron los agentes con mayor exigencia de retención para estos productos
 - ⊖ Los límites de toxicidad hallados para *E.grandis* tratado con ACQ-D y CA-B, para hongos descomponedores y termites, podrían ser tenidos en consideración para la instalación de ensayos de campo en contacto directo o proximidad con el suelo.
 - ⊖ Asimismo se deberá evaluar el desempeño de estos productos frente a pudrición blanda
- Madera de pino tratado:
 - CA-B: Para la clase UC4B, la retención establecida por la norma AWPAs es menor que el límite de toxicidad de basidiomicetes de 4,9kg/ m³ hallado en este trabajo. Este valor parece mostrar necesidad de incrementar especificación.
 - En el caso de ACQ-D, de acuerdo a los resultados obtenidos con retenciones especificadas para las clases UC4A y UC4B, menores a 9,1 kg/m³, no se obtiene protección para los agentes estudiados.
 - En el caso de haber termites en el sitio, las especificaciones de AWPAs para pino tratado con CA-B o ACQ-D para las clases UC4A y UC4B serían insuficientes. Para CCA-C, serían adecuadas.
 - Se verificó adecuación de retención de 6,8 kg/m³ de CCA-C en *Pinus spp.* enterrado en suelo en el ensayo instalado.
- La determinación del MOE resultó fundamental para evaluación de la pudrición blanda en contraste con a la evaluación visual, que no fue consonante con el deterioro mecánico
- Estos resultados significan un aporte a la estandarización de la impregnación de maderas en Uruguay y sustitución selectiva de CCA-A

5. REFERENCIAS

AENOR (Asociación Española de Normalización y Certificación). UNE-EN 460, (1995). Durabilidad de la madera y de los materiales derivados de la madera. Durabilidad natural de la

madera maciza. Guía de especificaciones de durabilidad natural de la madera para su utilización según las clases de riesgo. AENOR, Madrid. 11 p.

AWPA A9-01. 2001. AMERICAN WOOD PROTECTION ASSOCIATION STANDARD. Standard method for analysis of treated wood and treating solutions by X-ray spectroscopy. In American Wood Protection Association Standards 2008. 5p.

AWPA A16-08. 2008. AMERICAN WOOD PROTECTION ASSOCIATION STANDARD. Standard for HPLC method for didecyldimethyl ammonium chloride (DDAC) determination in treated wood. American Wood Protection Association Standards 2008. 1p.

AWPA A 28-08. 2008. AMERICAN WOOD PROTECTION ASSOCIATION STANDARD. Standard method for determination of propiconazole and tebuconazole in waterborne formulations and in treating solutions by HPLC. In American Wood Protection Association Standards 2008. 2p

AWPA E7-07 2007. AMERICAN WOOD PROTECTION ASSOCIATION STANDARD. Standard field test for evaluation of wood preservatives to be used in ground contact (UC4A, UC4B, UC4C); stake test. 9p.

AWPA. E25-08. 2008. AMERICAN WOOD PROTECTION ASSOCIATION STANDARD. Wood Protection Association American Standard. Standard Field Test For Evaluation Of Wood Preservatives Used To Be Above Ground (UC3B): Decking Test. 4p.

AWPA P5-08. 2008. AMERICAN WOOD PROTECTION ASSOCIATION STANDARD. Standard for Waterborne Preservatives. In American Wood Protection Association Standards 2008. 1 p

AWPA P32-10. 2010. AMERICAN WOOD PROTECTION ASSOCIATION STANDARD. Standard for copper azole type B (CA-B). In American Wood Protection Association Standards 2008.

AWPA P29-08. 2008. AMERICAN WOOD PROTECTION ASSOCIATION STANDARD. Standard for alkaline copper quat type D (ACQ-D). In American Wood Protection Association Standards 2008. In American Wood Protection Association Standards 2008. 1 p.

AWPA U1-08. 2008. AMERICAN WOOD PROTECTION ASSOCIATION STANDARD. USE CATEGORY SYSTEM: USER SPECIFICATION FOR TREATED WOOD. In American Wood Protection Association Standards 2008.

CEN (Comité Europeo de Normalización) EN 74. 1984. Wood Preservatives. Accelerated ageing of treated wood prior to biological testing- Leaching procedure. Secretaría Central, Bruselas. 16 p.

CEN (Comité Europeo de Normalización) EN 113. 1996. Wood Preservatives. Test method for determining the protective effectiveness against wood destroying basidiomycetes. Determination of toxic values. Secretaría Central, Bruselas. 16 p.

CEN (Comité Europeo de Normalización) EN 117. 1989. Protectores de la madera. Determinación del Umbral de eficacia contra *Reticulitermis santonensis* de Feytaud. Método de laboratorio. Secretaría Central, Bruselas. 18p.

CEN (Comité Europeo de Normalización) EN 252 AC1. 1989. Field test method for determining the relative effectiveness of wood preservative in ground contact. Secretaría Central, Bruselas. 17 p.

Dieste, A., 2012. Programa de promoción de Exportaciones de productos de madera. Dirección Nacional de Industrias. Ministerio de Industrias, Energía y Minería. Uruguay. Consejo Sectorial Forestal- Madera. 32p.

DINAMA (Dirección Nacional de Medio Ambiente) 2007. Guía de buenas prácticas en impregnación de madera. Tomo II: Gestión Ambiental y Producción más Limpia. 57 p. Artes Gráficas, Montevideo.

Doldán J.; Böthig, S. 2002. Propiedades físicas fundamentales en maderas de especies de prioridad forestal. Seminario de productos forestales JICA-LATU, Avances en la caracterización de maderas uruguayas. Diciembre, 2002.

Freeman, M., 2013. Data package to support the re-affirmation of AWPACCA-Type C [Chromated Copper Arsenate], In:AWPA Standards P-5 and P-23.CCA efficacy: a comprehensive and critical overview of existing data. 122pp.
http://wooddoc.org/utills/CCA/AWPA_CCA_Re_Affirm_Data_Package.pdf

INIA GRAS, 2016. Banco agroclimático de estación Experimental “Las Brujas” (noviembre 2016.) <http://www.inia.uy/gras/Clima/Banco-datos-agroclimatico>.

Jansen, A., Pizzi, A., & Conradie, W. (1985). The penetration characteristics of CCA preservatives in wood-radial/tangential, processes and species effects. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 186.

Köse, C; Kartal, N. S., 2010. Tolerance of brown-rot and dry-rot fungi to CCA and ACQ wood preservatives. *Turk J Agric For* 34 181-190

Lebow, S.; Highley, T. 2008. Regional Biodeterioration Hazards in the United States. En: ACS Symposium Series 982. Development of Commercial Wood Preservatives. Efficacy, Environmental and Health Issues. Schultz, P.; Militz H.; Freeman, M.H; Goodell & Nicholas, D.D. Editors. American Chemical Society, Washington, DC. ISBN 978-0-8412-3951-7.

Lopez, G A C. Oliveira A M F, Lepage E S . 1985. The evaluation of the effectiveness of wood preservatives by means of IUFRO's method for field tests with wooden stakes. *Proceedings Annual Meeting. IRG/WP 3348*

Nuñez. (2009). Distribución radial de polifenoles en troncos de *Eucalyptus grandis*. *Revista de Ciencia y Tecnología* N°11, 5-15.

O'Neill H.; Tarigo, F; Iraola P. 2005(a y b). Propiedades mecánicas de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden del Norte de Uruguay. Grupo Técnico de la madera aserrada de Eucalipto. LATU (Laboratorio Tecnológico del Uruguay). Montevideo. Informe n° 4. 44 p. Informe n° 5. 48 p

Pizzi, A., Conradie, E., & Jansen, A. (1986). Polyflavonoid tannins - a main cause of soft-rot failure in CCA-treated timber. *Wood Science and Technology*, 80.

Schultz, P.; Militz H.; Freeman, M.H; Goodell & Nicholas, 2008. Development of Commercial Wood Preservatives. Efficacy, Environmental and Health Issues., D.D. Editors. American Chemical Society, Washington, DC. ISBN 978-0-8412-3951-7.

Van Acker, J.; Stevens, M.; Carey, J.; Sierra-Alvarez, R.; Militz, H.; Le Bayon, I.; Kleist, G.; Peek, R. D. 2003. Biological durability of wood in relation to end-use. Part 1. Towards a European standard for laboratory testing of the biological durability of wood. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 61: 35-45.