



## Retención y penetración de sales de Boro en tres maderas Angiospermas: *Spathodea campanulata*, *Fraxinus americana* y *Albizia plurijuga*

### Retention and penetration of Boro salts in three Angiosperma woods: *Spathodea campanulata*, *Fraxinus americana* and *Albizia plurijuga*

Javier Ramón Sotomayor Castellanos<sup>1\*</sup>, Luz Elena Alfonsina Ávila Calderón<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Ciudad Universitaria, Morelia, Michoacán, México. C.P. 58030

\*Correspondencia: [madera999@yahoo.com](mailto:madera999@yahoo.com)

Rec.: 11.07.2019. Acept.: 16.09.2019.

Publicado el 31 de diciembre de 2019

#### Resumen

La impregnación con sales de boro es una alternativa tecnológica para la protección de la madera al biodeterioro. El objetivo de la investigación fue determinar la densidad de la madera, la retención y la penetración de sales de boro en la madera de tres especies angiospermas: *Spathodea campanulata*, *Fraxinus americana* y *Albizia plurijuga*. Con el método baño caliente-frío, se impregnaron probetas de pequeñas dimensiones en concentraciones de 1%, 2% y 3% de trihidróxido de boro y tetraborato de sodio, y se reservó un grupo de control sin tratamiento. Después de la impregnación, las densidades de *S. campanulata* y *A. plurijuga* no variaron para las diferentes concentraciones. En cambio, la densidad del grupo de control de *F. americana* fue diferente a las de las concentraciones de 1%, 2% y 3%. Las cantidades de las retenciones y de las penetraciones de las sales fueron diferentes para cada especie. La retención de sales de boro en las tres maderas disminuye a medida que su densidad y la concentración de sales se incrementan.

**Palabras clave:** impregnación de la madera, baño caliente-frío, sales de boro, densidad de la madera, retención, penetración.

#### Abstract

The impregnation with boron salts is a technological alternative for the protection of wood to biodeterioration. The objective of the research was to determine the density of the wood, the retention and the penetration of boron salts in the wood of three angiosperm species: *Spathodea campanulata*, *Fraxinus americana* and *Albizia plurijuga*. Small specimens were impregnated with the hot-cold bath method and concentrations of 1%, 2% and 3% of boron trioxide and sodium tetraborate, and a control group was reserved without treatment. After impregnation, the densities of *S. campanulata* and *A. plurijuga* did not vary for the different concentrations. Different case was the density of the control group of *F. americana* whose density was different from the concentrations of 1%, 2% and 3%. The amounts of the retentions and the penetrations of the salts were different for each species. The retention of boron salts in the three woods decreases as their density and salt concentration increase.

**Keywords:** wood impregnation, hot-cold bath, boron salts, wood density, retention, penetration.

## Introducción

La madera es un material biodegradable. Pese a esta ventaja ecológica, la madera es menos apreciada como material de ingeniería en comparación con otros componentes constructivos que requieren menos mantenimiento y que son más resistentes al biodeterioro. Frente a este reto, la tendencia contemporánea en tecnología de la madera es su modificación con tratamientos químicos, termo-mecánicos y de impregnación (Lahtela *et al.*, 2014, Gérardin, 2016, Sandberg *et al.*, 2017). La aplicación de preservantes a base de sales de boro es una tecnología que tiene por objetivo proteger a la madera de su deterioro ocasionado por hongos e insectos. Desde otra perspectiva, trata de disminuir el efecto de las condiciones ambientales y, accidentalmente, su exposición al fuego en el deterioro del plano leñoso (Adanur *et al.*, 2017).

Para determinar la capacidad de retención de sales de boro en la madera y su facilidad de penetración en el tejido celular, se han desarrollado procedimientos experimentales para optimizar combinaciones de temperatura, presión y concentración, o combinación de compuestos a base de boro (Obanda *et al.*, 2008, Simsek *et al.*, 2010, Percin *et al.*, 2015). Otras investigaciones se han orientado, por una parte, hacia la evaluación de la eficiencia de estos preservantes frente a diferentes agentes que deterioran la madera (Temiz *et al.*, 2008; Obounou-Akong *et al.*, 2015; Baysal *et al.*, 2016) y, por otra, se ha estudiado el efecto de la impregnación de la madera con boro sobre sus propiedades químicas (Kartal *et al.*, 2008; Caldeira, 2010; Lupsea *et al.*, 2013) y físicas (Awoyemi y Westermarck, 2005; Salman *et al.*, 2014; Keskin y Mutlu, 2017).

La retención y la penetración en la madera de sales de boro son parámetros que miden la idoneidad de un tratamiento de impregnación, y la aptitud que tiene una especie para su preservación (Berrocal *et al.*, 2004, Koumbi-Mounanga *et al.*, 2015, Pereira *et al.*, 2017). La información al respecto reportada en la literatura es amplia y los resultados son particulares a cada caso de estudio. La variedad de resultados puede ser atribuida, entre otras causas, a la amplia diversidad en la estructura anatómica entre especies de maderas y al interior del plano leñoso, así como a los diferentes enfoques experimentales, y a las combinaciones de sustancias preservantes empleadas en cada tratamiento.

No obstante, las tendencias para el desarrollo de tecnologías de preservación de la madera se orientan hacia el empleo de sustancias menos tóxicas (Singh y Singh, 2012; Pizzi, 2016; Berube *et al.*, 2018), de reducido impacto ecológico (Ahn *et al.*, 2010; Ruayruay y Khongtong, 2014; González-Laredo *et al.*, 2015), así como a perfeccionar los procedimientos

de impregnación (Gérardin, 2016; Aydemir *et al.*, 2016; Yorur y Kayahan, 2018). Una propuesta por parte de estas iniciativas es la recomendación de sales de boro como sustancia protectora de la madera y de experimentar con técnicas sencillas de preservado, como el método de baño caliente-frío. Este método para impregnar maderas con sales de boro es económico y de fácil implementación (Cruz, 2010; Ávila *et al.*, 2012; Sotomayor y Villaseñor, 2016). Igualmente, su eficiencia está documentada por Esteves *et al.* (2014), Lee *et al.* (2018) y Sotomayor *et al.* (2018).

La hipótesis de trabajo de esta investigación es que la retención de sales de boro en la madera *disminuye* a medida que su densidad aumenta; empero, la retención se *intensifica* cuando la concentración de las sales se *incrementa*. Esta suposición se restringe al caso de estudio de las especies y en las condiciones experimentales de esta investigación. La hipótesis es verificable midiendo, antes y después de impregnar probetas de pequeñas dimensiones, la densidad de la madera y su capacidad de retención de sales de boro.

El objetivo de la investigación fue determinar la densidad, la retención y la penetración de sales de boro en la madera de tres especies angiospermas: *Spathodea campanulata* P. Beauv., *Fraxinus americana* L. y *Albizia plurijuga* (Standley) Britton & Rose.

## Materiales y métodos

Se recolectaron piezas de madera de *S. campanulata*, *F. americana* y *A. plurijuga*, en aserraderos del estado de Michoacán, México. Para cada especie se prepararon 40 probetas con dimensiones de 0.02 m x 0.02 m de sección y 0.4 m de largo, orientadas respectivamente en las direcciones radial, tangencial y longitudinal de la madera (International Organization for Standardization, 2012). Las probetas contenían solo madera de duramen y estuvieron libres de defectos de crecimiento. Antes y después del tratamiento de impregnación, las probetas se almacenaron durante 12 meses en una cámara de acondicionamiento con una temperatura de 20 °C ( $\pm 1$  °C) y una humedad relativa del aire de 65% ( $\pm 5$ %), hasta que su peso fue constante y la madera alcanzó su contenido de humedad en equilibrio.

La densidad se determinó por la relación (1) (International Organization for Standardization, 2014a):

$$\rho_{CH} = \frac{P_{AT}}{V_{AT}} \times 100$$

Donde:

$\rho_{CH}$  = Densidad (kg m<sup>-3</sup>).

$P_{AT}$  = Peso antes y después del tratamiento (kg).

$V_{AT}$  = Volumen antes y después del tratamiento (m<sup>3</sup>).

El contenido de humedad se determinó por la relación (2) (International Organization for Standardization, 2014b):

$$CH = \frac{(P_{AT} - P_S)}{P_S} \times 100$$

Donde:

CH = Contenido de humedad (%).

$P_{AT}$  = Peso antes del tratamiento (kg).

$P_S$  = Peso en estado seco (kg).

Se prepararon tres soluciones con trihidróxido de boro y tetraborato de sodio en concentraciones de 1%, 2% y 3%. Las probetas se impregnaron con el método baño caliente-frío y se siguió el protocolo propuesto por Ávila *et al.* (2012). La madera se sumergió durante 8 horas en un baño de agua a una temperatura de 60 °C y presión atmosférica. A continuación, las probetas se sumergieron durante 16 horas en un baño frío, en la mezcla de sales de boro con temperatura de 23 °C y presión atmosférica.

La retención se determinó con la fórmula (3) (Simsek *et al.*, 2013):

$$R = \frac{(P_{DT} - P_{AT}) \times C}{V_{DT}}$$

Donde:

R = Retención (kg m<sup>-3</sup>).

$P_{DT}$  = Peso después del tratamiento (kg).

$P_{AT}$  = Peso antes del tratamiento (kg).

$V_{DT}$  = Volumen después del tratamiento (m<sup>3</sup>).

C = Concentración de la mezcla de sales de boro.

La penetración observada en el plano transversal a la dirección de la fibra de la madera se estimó de acuerdo con los criterios propuestos por Pereira *et al.* (2017) esquematizados en la Figura 1.

## Diseño experimental

La unidad experimental consistió en cuatro grupos de 40 probetas cada uno, correspondientes respectivamente a tres especies de maderas: *S. campanulata*, *F. americana* y *A. plurijuga*. Cada grupo representó un nivel de observación y se organizó a su vez en cuatro muestras independientes compuestas por diez probetas cada una. Una muestra se reservó como control y las tres muestras restantes se destinaron a pruebas de impregnación con concentraciones (C) de 1%, 2% y 3% de solución con trihidróxido de boro y tetraborato de sodio. El procedimiento de impregnación se consideró como tratamiento. Las variables de respuesta fueron la densidad de la madera ( $\rho_{CH}$ ), la retención (R) y la penetración ( $\Phi$ ) de sales de boro. El contenido de humedad de la madera se consideró un parámetro de referencia. Para aligerar el texto, en lo subsecuente el término *densidad de la madera* se escribirá solo como *densidad*.

Para identificar la densidad y la retención de cada una de las nueve muestras, se calcularon su media ( $\bar{x}$ ), su desviación estándar ( $\sigma$ ) y su coeficiente de variación en por ciento ( $CV = \sigma/\bar{x}$ ). Para la variable penetración solo se determinó su porcentaje y tipo. Se determinaron la normalidad en su distribución con el criterio de demarcación para el sesgo estandarizado (SE) y el apuntamiento estandarizado (AE):  $[-2 < SE \text{ y/o } AE < +2]$ . Cuando los valores de SE y AE no satisficieron el criterio de demarcación, se efectuaron pruebas de diferencias de medianas de Kruskal-Wallis. Para cada grupo de tres muestras correspondientes a una especie, se verificó la igualdad de varianzas con la hipótesis: con un nivel de significancia de 5% ( $\alpha = 0.05$ ).

A continuación, se practicaron análisis de varianza con la hipótesis nula: con un nivel de significancia de 5% ( $\alpha = 0,05$ ). El criterio de demarcación fue aceptar una diferencia estadísticamente significativa para valores  $P_{(\alpha = 0.05)} \leq 0.05$ . Para identificar cuáles niveles se diferenciaron en el análisis de varianza, se realizaron pruebas de rangos múltiples.

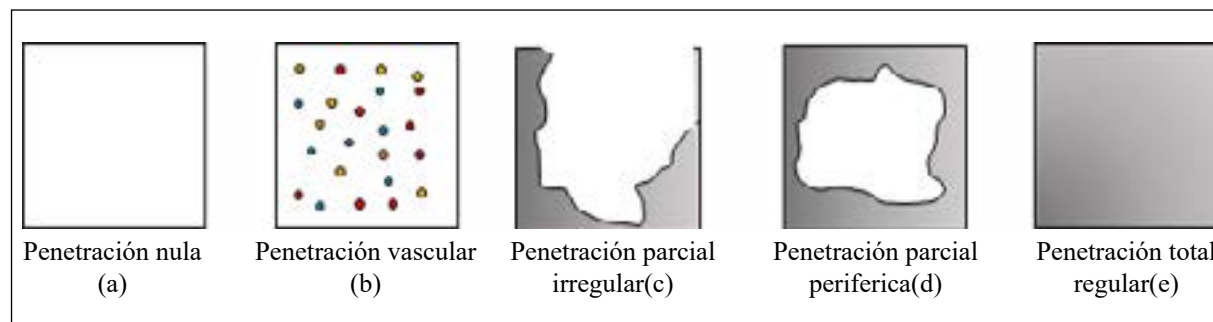


Figura 1. Tipos de penetración nula (a), vascular (b), irregular(c), parcial periférica (d) y total regular (e)

Para analizar las tendencias de las variables de respuesta, se calcularon las regresiones lineales ( $y = ax + b$ ) y sus coeficientes de determinación ( $R^2$ ) entre la retención (R), como variable dependiente en función de la densidad ( $\rho_{CH}$ ) y de la concentración (C), como variables independientes. Para este último análisis, el grupo de control se consideró con una concentración cero. Las ponderaciones para calificar la intensidad de las correlaciones lineales fueron los valores del coeficiente de determinación propuestos por Tippner *et al.* (2016): correlación muy alta:  $1 \geq R^2 \geq 0.9$ ; correlación alta:  $0.9 > R^2 \geq 0.7$ ; correlación media:  $0.7 > R^2 \geq 0.4$ ; correlación baja:  $0.4 > R^2 \geq 0.2$ ; y correlación nula:  $R^2 < 0.2$ .

### Resultados y discusión

El Cuadro 1 muestra las densidades y retenciones de los grupos de control y de las tres concentraciones para *S. campanulata*, *F. americana* y *A. plurijuga*. El Cuadro 2 muestra los resultados de las pruebas de normalidad y de verificación, así como de análisis de varianza.

#### Contenido de humedad

El contenido de humedad antes del tratamiento de impregnación fue de 8% (CV = 14%) para *S. campanulata*, para *F. americana* fue de 10% (CV = 6%) y para *A. plurijuga* fue de 12% (CV = 5%). La madera se acondicionó a un estado de humedad seco y homogéneo entre especies, de tal forma que la variación

en el contenido de humedad de la madera no intervino de manera significativa en los resultados.

#### Densidad

Las magnitudes de las densidades del grupo de control que no fue sometido a ningún tratamiento, entre las especies, varían desde 351 kg m<sup>-3</sup> para *S. campanulata* hasta 830 kg m<sup>-3</sup> para *A. plurijuga*, lo que permitió observar un amplio rango de densidades (Cuadro 1). Las distribuciones de los datos de la densidad de las cuatro muestras fueron normales, con excepción de la densidad del grupo de control de *S. campanulata* (Cuadro 2).

Se observan diferencias aritméticas entre los valores medios de las densidades del grupo de control y de los de tratamiento. Sin embargo, desde el punto de vista estadístico, los valores medios de las densidades para *S. campanulata* y *A. plurijuga* no varían entre el grupo de control y las tres concentraciones (Cuadros 2 y 3). Con todo, para *F. americana* se observa una diferencia entre las densidades del control y las de las tres concentraciones.

Al respecto, la bibliografía reporta variaciones en la densidad de la madera ocasionadas, entre otros factores, por el peso de las sales de boro, la diversidad en la porosidad de la especie en estudio y, cuando es el caso, el efecto de la temperatura empleada para impregnar la madera (Percin *et al.*, 2015).

Igualmente, los coeficientes de variación oscilaron entre 2.7% (*A. plurijuga*) y 6.3% (*S. campanulata*). No se observa una tendencia para el coeficiente de variación de acuerdo a la especie, a la densidad y/o

**Cuadro 1. Densidades y retenciones para las tres concentraciones de la solución con trihidróxido de boro y tetraborato de sodio en *S. campanulata*, *F. americana* y *A. plurijuga***

Especie	$\rho_{CH}$	$\rho_{CH}$	R	$\rho_{CH}$	R	$\rho_{CH}$	R
	(kg m <sup>-3</sup> )	(kg m <sup>-3</sup> )	(kg m <sup>-3</sup> )	(kg m <sup>-3</sup> )	(kg m <sup>-3</sup> )	(kg m <sup>-3</sup> )	(kg m <sup>-3</sup> )
	Control	C = 1%		C = 2%		C = 3%	
<i>S. campanulata</i>	351	363	2.26	343	4.22	347	6.38
$\sigma$	22.0	26.8	0.10	12.9	0.20	27.0	0.41
CV	6.3	7.4	4.6	3.7	4.8	7.8	6.4
<i>F. americana</i>	654	650	1.63	659	3.30	610	5.20
$\sigma$	36.3	28.8	0.16	47.9	0.21	29.3	0.46
CV	5.6	4.4	9.5	7.3	6.3	4.8	8.9
<i>A. plurijuga</i>	830	845	1.28	849	2.43	827	3.70
$\sigma$	22.1	26.9	0.13	27.1	0.48	38.4	0.27
CV	2.7	3.2	9.8	3.2	19.8	4.6	7.3

$\rho_{CH}$  = Densidad; R = Retención; Control = C = 0%; C = Concentración; = Media (kg m<sup>-3</sup>);  $\sigma$  = Desviación estándar (kg m<sup>-3</sup>); CV = Coeficiente de variación (%).

**Cuadro 2. Pruebas de normalidad, de verificación y análisis de varianza**

Especie	P <sub>CH</sub>		C = 1%		C = 2%		C = 3%		
	Control	SE	AE	SE	AE	SE	AE	SE	AE
<i>S. campanulata</i>	2.68	2.85	-0.32	-0.46	-0.19	0.55	0.57	0.21	
<i>F. americana</i>	0.24	-1.25	1.14	1.23	0.26	-0.45	-0.83	-0.95	
<i>A. plurijuga</i>	-0.09	-0.84	-0.13	0.23	-1.29	0.83	1.52	1.41	
	Ver-var				Anova				
	P <sub>(α=0.05)</sub>				P <sub>(α=0.05)</sub>				
<i>S. campanulata</i>	0.391				0.276‡				
<i>F. americana</i>	0.263				0.018*				
<i>A. plurijuga</i>	0.769				0.269				
Especie	R		C = 1%		C = 2%		C = 3%		
	Control	SE	AE	SE	AE	SE	AE	SE	AE
<i>S. campanulata</i>	-	-	-0.12	0.47	-0.61	-0.48	0.04	1.39	
<i>F. americana</i>	-	-	-0.27	0.11	-0.20	-0.69	1.39	0.56	
<i>A. plurijuga</i>	-	-	-0.14	-0.70	-2.14	1.65	0.13	-1.76	
	Ver-var				Anova				
	P <sub>(α=0.05)</sub>				P <sub>(α=0.05)</sub>				
<i>S. campanulata</i>	0.011*				< 0.001*				
<i>F. americana</i>	0.001*				< 0.001*				
<i>A. plurijuga</i>	< 0.001*				< 0.001‡*				

**p<sub>CH</sub>** = Densidad (kg m<sup>-3</sup>); **R** = Retención (kg m<sup>-3</sup>); **Control: C = 0%**; **C = Concentración**; **SE = Sesgo estándar**; **AE = Apuntamiento estándar**; **Ver-var = Verificación de varianza**; **Anova = Análisis de varianza**; \*P<sub>(α=0.05)</sub> ≤ 0.05: existe una diferencia estadísticamente significativa entre las desviaciones estándar y/o entre las varianzas, con un nivel del 95% de confianza; ‡ Prueba de Kruskal-Wallis.

a la concentración de sales de boro (Figura 2). Estos resultados son similares a los reportados por Sotomayor (2015) para las tres especies en estudio.

### Retención

Las distribuciones de los resultados de las retenciones del grupo de control y de las muestras de las tres concentraciones fueron normales, con excepción de la retención alcanzada con la concentración de 2% para *A. plurijuga* (Cuadro 2). Sin embargo, los valores medios de la retención presentan diferencias estadísticamente significativas de acuerdo al nivel de concentración de sales de boro y entre especies (Cuadro 3).

Las pruebas de rangos múltiples indican que existen diferencias entre los cuatro grupos analizados y esto para las tres especies en estudio (Cuadro 3). No se observa una tendencia en los coeficientes de variación de la retención de sales de boro relacionados con la especie, con la densidad y/o con la concentración de

sales de boro (Figura 3).

Con excepción de la concentración C = 1% de *F. americana* y *A. plurijuga*, las magnitudes de las retenciones correspondientes a las concentraciones de *S. campanulata*, *F. americana* y *A. plurijuga* fueron mayores que el límite inferior tóxico de retención reportado en los siguientes trabajos anteriores: de acuerdo con Freitag y Morrell (2005), el umbral mínimo de retención de sales de boro necesario para proteger la madera de las pudriciones ocasionadas por hongos o moho está comprendido en el intervalo de retención que va de 0.2 kg m<sup>-3</sup> a 4.7 kg m<sup>-3</sup>. La American Wood-Preservers' Association (AWPA, 2014) recomienda una retención mínima de sales de boro de 2.72 kg m<sup>-3</sup> en la madera para elementos estructurales empleados en interiores. Por su parte, Kartal (2008) propone una retención mínima de 1 kg m<sup>-3</sup> para protección de la madera en condiciones de servicio al exterior, criterio que permite aceptar todas las retenciones de esta investigación como aceptables.

**Cuadro 3. Promedios de densidad y retención de tres concentraciones de la solución con trihidróxido de boro y tetraborato de sodio en *S. campanulata*, *F. americana* y *A. plurijuga***

		$\rho_{CH}$		
<i>S. campanulata</i>				
Control C = 0%	X			
C = 1%	X			
C = 2%	X			
C = 3%	X			
<i>F. americana</i>				
Control C = 0%	X			
C = 1%		X		
C = 2%		X		
C = 3%		X		
<i>A. plurijuga</i>				
Control C = 0%	X			
C = 1%	X			
C = 2%	X			
C = 3%	X			
		R		
<i>S. campanulata</i>				
Control C = 0%	X			
C = 1%		X		
C = 2%			X	
C = 3%				X
<i>F. americana</i>				
Control C = 0%	X			
C = 1%		X		
C = 2%			X	
C = 3%				X
<i>A. plurijuga</i>				
Control C = 0%	X			
C = 1%		X		
C = 2%			X	
C = 3%				X

$\rho_{CH}$  = Densidad ( $\text{kg m}^{-3}$ ); R = Retención ( $\text{kg m}^{-3}$ ); No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's.

Por su parte, la norma NMX-C-322-ONNCCE-2014 (ONNCCE, 2014) recomienda para los niveles de riesgo R1 y R2, correspondientes a madera en interiores de uso no estructural, retenciones de boro inorgánico de  $2.7 \text{ kg m}^{-3}$  (R1) y  $6.4 \text{ kg m}^{-3}$  (R2), respectivamente. Con un tratamiento de impregnación sin presión y utilizando sales de boro con concentración de 5%, Percin *et al.*, (2015) reportan para probetas con dimensiones de  $0.05 \text{ m} \times 0.08 \text{ m} \times 0.8 \text{ m}$  de *Quercus petraea* ( $\rho_{CH} = 732 \text{ kg m}^{-3}$ )

valores de retención entre  $6.73 \text{ kg m}^{-3}$  y  $8.27 \text{ kg m}^{-3}$ . Por su parte, Simsek *et al.* (2010) empleando sales de boro con concentración de 3%, durante 60 minutos y presión de  $760 \text{ mm Hg}^{-1}$ , reportan retenciones para probetas de  $0.02 \text{ m} \times 0.02 \text{ m} \times 0.36 \text{ m}$  de *Fagus orientalis* ( $\rho_{CH} = 710 \text{ kg m}^{-3}$ ) de  $17.42 \text{ kg m}^{-3}$  y de *Pinus sylvestris* ( $\rho_{CH} = 550 \text{ kg m}^{-3}$ ) de  $15.98 \text{ kg m}^{-3}$ .

Los datos de cada una de las pruebas de retención muestran que las retenciones de sales de boro disminuyen a medida que la densidad de la madera aumenta (Figura 4). Las retenciones se agrupan por especie y muestran tendencias a la baja con altos coeficientes de determinación. Estos resultados verifican la primera parte de la hipótesis de trabajo propuesta esta investigación.

Para las tres especies, las retenciones aumentan en función de la concentración utilizada con correlaciones muy altas ( $R^2 > 0.9$ ) (Figura 5). De esta forma, se verifica la segunda parte de la hipótesis de trabajo propuesta en esta investigación. Estos resultados corroboran las conclusiones reportadas por Adanur *et al.* (2017), quienes concluyen que para *Ragús orientalis* ( $\rho_{CH} = 520 \text{ kg m}^{-3}$ ) la retención de sales de boro aumenta a medida que la concentración de las sales de boro se incrementa, en un rango que va de 1% a 5%.

### Penetración

El Cuadro 4 presenta los resultados de las pruebas de penetración de sales de boro. No se observó ninguna tendencia del tipo y/o porcentaje de la penetración relacionada con la especie en cuestión, con la densidad de la madera y/o con la concentración de sales de boro. En este contexto, el porcentaje de la penetración de tipo total regular de la madera de *S. campanulata* es diferente a la correspondiente a *F. americana* y *A. plurijuga*.

Caso especial es *F. americana*, cuyos resultados indican que cuando se incrementa la concentración de sales de boro, se incrementa el porcentaje de la penetración de tipo total regular.

La norma NMX-C-322-ONNCCE-2014 (ONNCCE, 2014) exige como requisito mínimo de penetración el 100% en piezas de madera con dimensiones máximas de  $0,025 \text{ m}$  en las direcciones radial y/o tangencial de la madera de albura. De aquí, *S. campanulata* satisface este criterio. En cambio, *F. americana* y *A. plurijuga* no lo hacen.

### Conclusiones

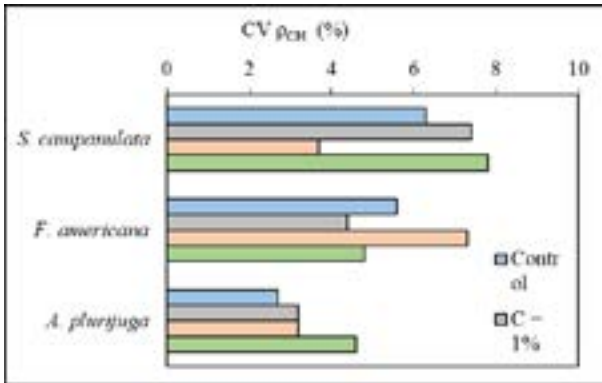


Figura 2. Coeficientes de variación (CV) de la densidad ( $\rho_{CH}$ ) para el control y las tres concentraciones (C)

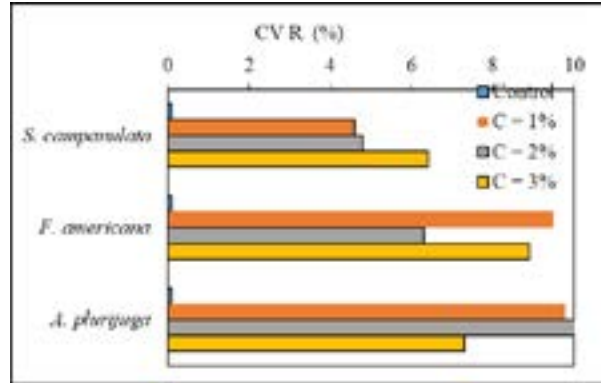


Figura 3. Coeficientes de variación (CV) para la retención (R), para el control y las tres concentraciones (C)

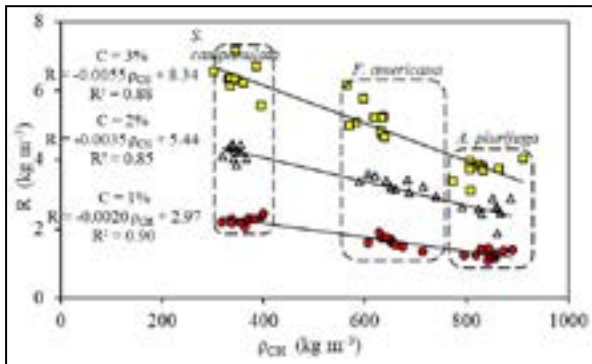


Figura 4. Correlaciones entre la retención (R) y la densidad ( $\rho_{CH}$ ) para las tres concentraciones (C)

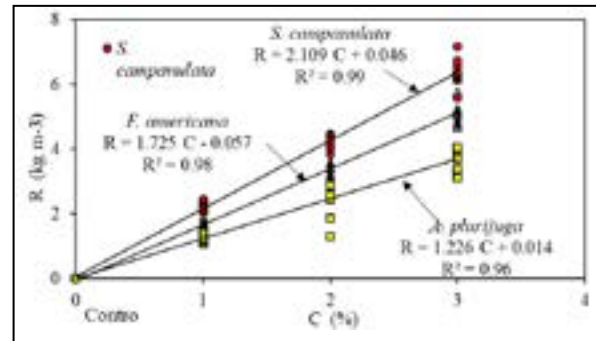


Figura 5. Correlaciones entre la retención (R) y las tres concentraciones (C) para *S. campanulata*, *F. americana* y *A. plurijuga*

Cuadro 4. Resultados de las mediciones de penetración

Especie	$\rho_{CH}$ (kg m <sup>-3</sup> )	C (%)	$\Phi$	
			(%)	Tipo
<i>S. campanulata</i>	363	1	100	Total regular
			0	Parcial regular
	343	2	100	Total regular
			0	Parcial regular
	347	3	100	Total regular
			0	Parcial regular
<i>F. americana</i>	650	1	20	Total regular
			80	Parcial regular
	659	2	40	Total regular
			60	Parcial regular
	610	3	90	Total regular
			10	Parcial regular
<i>A. plurijuga</i>	845	1	70	Total regular
			30	Parcial regular
	849	2	90	Total regular
			10	Parcial regular
	827	3	90	Total regular
			10	Parcial regular

$\rho_{CH}$  = Densidad; C = Concentración;  $\Phi$  = Penetración.

El método de impregnación baño caliente-frío permite impregnar probetas de maderas angiospermas de pequeñas dimensiones con trihidróxido de boro y tetraborato de sodio y obtener retenciones que van desde 1.28 kg m<sup>-3</sup> para *A. pluriyuga*, hasta 6.38 kg m<sup>-3</sup> para *S. campanulata*. Los resultados confirman que la retención de sales de boro en las maderas estudiadas disminuye a medida que su densidad y la concentración de sales incrementan. De tal forma, que las densidades de *S. campanulata*, *F. americana* y *A. pluriyuga* son útiles en la predicción de la cantidad de retención de sales de boro.

### Agradecimientos

La investigación estuvo patrocinada por la Coordinación de la Investigación Científica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Se agradece a los alumnos de la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera por su participación en los trabajos de laboratorio.

### Bibliografía

- American Wood-Preservers' Association (AWPA). 2014. P5-07 Standard for Waterborne Preservatives. American Wood-Preservers' Association. Chicago, United States. 6 p.
- Adanur, H., Fidan, M., and Yasar, S. 2017. The technological properties of oriental beech (*Fagus orientalis* lipsky) impregnated with boron compounds and natural materials, *BioResources* 12(1): 1647-1661.
- Ahn, S., Oh, S., Choi, I., Han, G., Jeong, H., Kim, K., Yoon, Y., and Yang, I. 2010. Environmentally friendly wood preservatives formulated with enzymatic-hydrolyzed okara, copper and/or boron salts. *Journal of Hazardous Materials* 178(1): 604-611.
- Ávila, L., Herrera, M., y Raya, D. 2012. Preservación de la Madera en México. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, México. 135 p.
- Awoyemi, L., and Westermarck, U. 2005. Effects of borate impregnation on the response of wood strength to heat treatment. *Wood Science and Technology* 39(6): 484-491.
- Aydemir, D., Civi, B., Alsan, M., Can, A., Sivrikaya, H., Gunduz, G., and Wang, A. 2016. Mechanical, morphological and thermal properties of nano-boron nitride treated wood materials. *Maderas: Ciencia y Tecnología* 18(1): 19-32.
- Baysal, E., Tomak, E. D., Topaloglu, E., and Pesman, E. 2016. Surface properties of bamboo and scots pine impregnated with boron and copper based wood preservatives after accelerated weathering. *Maderas: Ciencia y Tecnología* 18(2): 253-264.
- Berrocal, A., Muñoz, F., y González, G. 2004. Ensayo de penetrabilidad de dos preservantes a base de boro en madera de melina (*Gmelina arborea*) crecida en Costa Rica. *Kurú: Revista Forestal* 1(3): 1-12.
- Berube, M. A., Schorr, D., Ball, R. J., Landry, V., and Blanchet, P. 2018. Determination of in situ esterification parameters of citric acid-glycerol based polymers for wood impregnation. *Journal of Polymers and the Environment* 26(3): 970-979.
- Caldeira, F. 2010. Boron in wood preservation. A Review in its Physico-Chemical Aspects. *Silva Lusitana* 18(2): 179-196.
- Cruz De León, J. 2010. Manual para la Protección contra el Deterioro de la Madera. Comisión Nacional Forestal. Morelia, México. 94 p.
- Esteves, B., Nunes, L., Domingos, I., and Pereira, H. 2014. Improvement of termite resistance, dimensional stability and mechanical properties of pine wood by paraffin impregnation. *European Journal of Wood and Wood Products* 72(5): 609-615.
- Freitag, C., and Morrell, J. J. 2005. Development of threshold values for boron and fluoride in non-soil contact applications. *Forest Products Journal* 55(4): 97-101.
- Gérardin, P. 2016. New alternatives for wood preservation based on thermal and chemical modification of wood. A review. *Annals of Forest Science* 73(3): 559-570.
- González-Laredo, R. F., Rosales-Castro, M., Rocha-Guzman, N. E., Gallegos-Infante, J. A., Moreno-Jimenez, M. R., and Karchesy, J. J. 2015. Wood preservation using natural products. *Madera y bosques* 2 (Número esp.): 63-76.
- International Organization for Standardization. 2012. ISO 3129:2012. Wood. Sampling methods and general requirements for physical and mechanical testing of small clear wood specimens. International Organization for Standardization. Geneva, Switzerland. 9 p.
- International Organization for Standardization. 2014a. ISO 13061-2:2014. Physical and mechanical properties of wood. Test methods for small clear wood specimens. Part 2: Determination of density for physical and mechanical tests. International Organization for Standardization. Geneva, Switzerland. 5 p.
- International Organization for Standardization. 2014b. ISO 13061-1:2014. Physical and mechanical properties of wood. Test methods for small clear wood specimens. Part 1: Determination of moisture content for physical. International Organization for Standardization. Geneva, Switzerland. 4 p.
- Kartal, S. N. 2008. Combined effect of boron compounds and heat treatments on wood properties: boron release and decay and termite resistance. *Holzforschung* 60(4): 455-458.
- Kartal, S. N., Hwang, W. J., and Imamura, Y. 2008. Combined



- effect of boron compounds and heat treatments on wood properties: Chemical and strength properties of wood. *Journal of Materials Processing Technology* 198(1): 234-240.
- Keskin, H., and Mutlu, E. 2017. Impacts of impregnation with fire retardant chemicals on the MOE in bending of some woods. *Journal of Polytechnic* 20(3): 607-612.
- Koumbi-Mounanga, T., Morris, P. I., Lee, M. J., Saadat, N. M., Leblon, B., and Cooper, P. A. 2015. Prediction and evaluation of borate distribution in Eastern black spruce (*Picea mariana* var. *mariana*) wood products. *Wood Science and Technology* 49(3): 457-473.
- Lahtela, V., Hamalainen, K., and Karki, T. 2014. The effects of preservatives on the properties of wood after modification (Review paper). *Baltic forestry*, 20(1): 189-203.
- Lee, S. H., Ashaari, Z., Lum, W. C., Abdul Halip, J., Ang, A. F., Tan, L. P., Chin, K. L., and Md Tahir, P. 2018. Thermal treatment of wood using vegetable oils: A review. *Construction and Building Materials* 181: 408-419.
- Lupsea, M., Mathies, H., Schoknecht, U., Tiruta-Barna, L., and Schiopu, N. 2013. Biocide leaching from CBA treated wood. A mechanistic interpretation. *Science of the Total Environment* 444: 522-530.
- Obanda, D. N., Shupe, T. F., and Barnes, H. M. 2008. Reducing leaching of boron-based wood preservatives. A review of research. *Bioresource Technology* 99(15): 7312-7322.
- Obounou-Akong, F., Gérardin, P., Thévenon, M. F., and Gérardin-Charbonnier, C. 2015. Hydrogel-based boron salt formulations for wood preservation. *Wood Science and Technology* 49(3): 443-456.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. 2014. NMX-C-322-ONNCCE-2014. Industria de la Construcción - Madera Preservada a Presión - Clasificación y Requisitos. ONNCCE. México, México. 5 p.
- Percin, O., Sofuoğlu, S. D., and Uzun, O. 2015. Effects of boron impregnation and heat treatment on some mechanical properties of oak (*Quercus petraea* Liebl.) wood. *BioResources* 10(3): 3963-3978.
- Pereira Baraúna, E. E., Mota Nunes, A., Cabral Moulin, J., Campos Monteiro, T., Chaves Arantes, M. D., and Benigno Paes, J. 2017. Influence of boron compounds on the physical properties of *Eucalyptus* sp wood. *Scientia forestalis* 45(113): 197-204.
- Pizzi, A. 2016. Wood products and green chemistry. *Annals of Forest Science* 73(1): 185-203.
- Ruayruay, W., and Khongtong, S. 2014. Impregnation of natural rubber into rubber wood: A green wood composite. *BioResources* 9(3): 5438-5447.
- Salman, S., Pétrissans, A., Thévenon, M. F., Dumarçay, S., Perrin, D., Pollier, B., and Gérardin, P. 2014. Development of new wood treatments combining boron impregnation and thermo modification: Effect of additives on boron leachability. *European Journal of Wood and Wood Products* 72(3): 355-365.
- Sandberg, D., Kutnar, A., and Mantanis, G. 2017. Wood modification technologies. A review. *Iforest-Biogeosciences and forestry* 10(6): 895-908.
- Simsek, H., Baysal, E., and Peker, H. 2010. Some mechanical properties and decay resistance of wood impregnated with environmentally-friendly borates. *Construction and Building Materials* 24: 2279-2284.
- Simsek, H., Baysal, E., Yilmaz, M., and Culha, F. 2013. Some mechanical properties of wood impregnated with environmentally-friendly boron and copper based chemicals. *Wood Research* 58(3): 495-504.
- Singh, T., and Singh, A. P. 2012. A review on natural products as wood protectant. *Wood Science and Technology* 46(5): 851-870.
- Sotomayor Castellanos, J. R. 2015. Banco FITECMA de características físico-mecánicas de maderas mexicanas. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, México. 69 p.
- Sotomayor Castellanos, J. R., y Villaseñor Aguilar, J. M. 2016. Retención y absorción de solución de sales de boro de diez maderas mexicanas. *Acta universitaria* 26(2): 12-19.
- Sotomayor Castellanos, J. R., Giraldo Forero, M. P., Gené Sera, J., Correal Mòdol, E., y Vilches Casals, M. 2018. Efecto de sales de boro en la densidad y en el módulo de elasticidad de tres maderas mexicanas. *Ingeniería* 28(2): 31-44.
- Temiz, A., Alfredsen, G., Eikenes, M., and Terziev, N. 2008. Decay resistance of wood treated with boric acid and tall oil derivatives. *Bioresource Technology* 99(7): 2102-2106.
- Tippner, J., Hrivnák, J., and Kloiber, M. 2016. Experimental Evaluation of Mechanical Properties of Softwood using Acoustic Methods. *BioResources* 11(1): 503-518.
- Yorur, H., and Kayahan, K. 2018. Improving Impregnation and Penetration Properties of Refractory Woods Through Cryogenic Treatment. *BioResources* 13(1): 1829-1842.