

TIEMPO DE ESTERILIZACIÓN MEDIANTE VAPOR DE LA MADERA ASERRADA DE PINO RADIATA

STEAM STERILIZATION TIME OF STACKED RADIATA PINE PACKAGING MATERIAL

Rubén A. Ananías^{1,}*

<https://orcid.org/0000-0002-3155-0457>

Victor Sepúlveda-Villaruel²

<https://orcid.org/0000-0002-9537-9951>

Linette Salvo-Sepúlveda¹

<https://orcid.org/0000-0003-4653-7607>

RESUMEN

La madera de pino radiata destinada a la fabricación de embalajes para exportación requiere ser esterilizada de acuerdo a las normas fitosanitarias internacionales NIMF 15. En el presente trabajo se estudió en secaderos industriales el tiempo de esterilización con vapor que es necesario emplear con madera aserrada verde de pino radiata apilada sin separadores y destinada a la fabricación de embalajes, considerando como factores variables la temperatura del vapor (80 °C, 90 °C y 100 °C), el espesor de las piezas de madera (16 mm, 38 mm y 53 mm) y la altura del subpaquete de madera (150 mm, 200 mm y 400 mm). Un experimento piloto fue realizado en un horno industrial de 40 m³. Posteriormente se escaló el experimento a hornos industriales de 100 m³. Los resultados mostraron que el tiempo necesario para la esterilización con vapor en el rango de temperaturas analizado, aumenta significativamente con el espesor de las tablas y con la altura del subpaquete. El tiempo mínimo para obtener las condiciones de esterilización con vapor en la madera apilada de pino radiata varió de 123 min hasta un máximo de 2275 min.

Palabras clave: Embalajes de madera, *Pinus radiata*, protección de la madera, tratamiento fitosanitario, tratamiento térmico.

ABSTRACT

Radiata pine wood packaging needs to be sterilized according to international phytosanitary standards. In this work the heat sterilization time of green radiata pine packaging material stacked without separators was studied on an industrial scale, considering as variable factors the steam temperature (80, 90 and 100) °C, the thickness of the wood (16, 38 and 53) mm and the height of the wood pile (150, 200 and 400) mm. The pilot experiment was conducted in a 40 m³ industrial oven. Subsequently the experiment was scaled to 100 m³ ovens. The results showed that the heat sterilization time in the analyzed temperature range depends significantly on the thickness and height of the stack. The minimum time to obtain heat sterilization conditions of radiata pine packaging material varied from 123 min to a maximum of 2275 min.

Keywords: Wood packaging material, *Pinus radiata*, wood protection, phytosanitary treatments, heat treatment.

¹Universidad del Bío-Bío, Departamento de Ingeniería en Maderas. Concepción, Chile.

²Universidad del Bío-Bío, ViceRectoría de Investigación y Postgrados, Laboratorio de Investigación en Secado y Tratamientos Térmicos de la Madera. Concepción, Chile.

*Autor para correspondencia: ananias@ubiobio.cl

Received: 22.12.2019 Accepted: 20.11.2020

INTRODUCCIÓN

El comercio internacional de madera de coníferas implica ciertos riesgos fitosanitarios debido a la introducción de plagas, que producen impacto no sólo a nivel ecológico sino que también económico. Desde el punto de vista económico, los principales costos se deben a la desvalorización de la madera deteriorada y a los gastos en control y erradicación de las plagas. En USA y Australia el impacto económico por concepto fitosanitario en el ámbito forestal es significativo (Leal *et al.* 2010, Carnegie *et al.* 2018)

Uno de los agentes bióticos causante de riesgos fitosanitarios en la madera de pináceas es el nematodo del pino *Bursaphelenchus xylophilus*. Este nematodo ha sido encontrado asociado principalmente con el coleóptero xilófago *Monochamus* sp. (Haack *et al.* 2011). En Chile *Monochamus* sp. y su vector asociado *Bursaphelenchus xylophilus* son consideradas un riesgo de plaga potencial dada las extensas plantaciones de pino radiata (*Pinus radiata*); una de las plagas introducidas en Chile son los escarabajos de la corteza del pino, tal como *Hylurgus ligniperda* (Mausel *et al.* 2007).

Una forma de enfrentar los riesgos fitosanitarios de plagas como las citadas más arriba en el comercio internacional de maderas, es mediante la aplicación de la Norma Internacional de Medidas Fitosanitarias NIMF 15 (Haack *et al.* 2014). Los tratamientos fitosanitarios aceptados por las normas internacionales NIMF 15 para el comercio internacional de madera para pallets son el tratamiento con bromuro de metilo BM, el tratamiento térmico con calor convencional HT y el tratamiento térmico mediante calentamiento dieléctrico DH (NIMF 15 2019). Además, se ha aceptado la homologación del secado como medio de tratamiento de esterilización con calor en madera que ha sido secada debajo de 20 % HT-KD (Ananías *et al.* 2013, Wang 2010). A nivel mundial, además para reducir el uso de BM, que degrada la capa de ozono (MBTOC 2018), otros tratamientos químicos potencialmente más amigables ambientalmente, han estado igualmente siendo evaluados para esterilizar maderas (Arcos *et al.* 2015, Douda *et al.* 2015, Naves *et al.* 2019).

El tratamiento HT (heat treatment) para madera de exportación para embalajes se considera más amigable con el medio ambiente. Siendo así, las normas fitosanitarias internacionales (NIMF 15 2019), establecen que se debe conseguir calentar con vapor el centro de la madera a una temperatura de 56 °C y mantener ésta por al menos 30 minutos, este tratamiento con calor HT permite esterilizar la madera de hongos, insectos y nematodos (Morrell 1995).

En la literatura se reporta que el tratamiento con vapor HT, es condicionado por la temperatura y el espesor de la madera. Una elevada temperatura en el ambiente en combinación con un bajo espesor de la madera disminuye la duración del tratamiento HT (Ananías y Venegas 2005). En el mismo sentido al incrementar sólo la temperatura disminuye el tiempo para la esterilización HT (Simpson 2003, Simpson 2006, Simpson e Illman 2004). La especie usada igualmente afecta el tiempo de tratamiento, las coníferas presentan tiempos más rápidos de esterilización con vapor (Chen *et al.* 2018).

Ensayos a la escala industrial realizados en Chile con madera de pino radiata, muestran que los programas de secado convencional acelerado y por alta temperatura, permiten homologar el secado como tratamiento de esterilización de esta madera para embalajes proceso HT-KD (heat treatment-kiln dried) (Ananías *et al.* 2013). En todos estos casos el programa de secado se inicia con un calentamiento inicial con la mínima diferencia psicrométrica hasta la temperatura de bulbo húmedo y posteriormente un aumento de la temperatura ambiente hasta la temperatura del programa respectivo, el secado continúa bajo esa condición hasta que la madera alcanza un contenido de humedad final menor o igual a 20 % base seca.

Este trabajo tiene como objetivo estudiar experimentalmente la evolución temporal de la temperatura en madera verde apilada (sin empalillar) de pino radiata, durante ensayos de calentamiento usando vapor para cumplir con las exigencias de tratamiento térmico, esto es calentar el centro de la madera hasta 56 °C y mantener esta condición por 30 minutos continuos en todo el subpaquete de madera de acuerdo a lo especificado por la norma NIMF 15-2019. En adición, se desea correlacionar el tiempo cumplido (tiempo que incluye los 30 minutos en el centro de la madera, requeridos por la norma NIMF 15) de esterilización con calor de la madera verde apilada en base al espesor y la altura del subpaquete, dada una temperatura de trabajo.

METODOLOGIA

Se realizaron ensayos experimentales para determinar el tiempo cumplido del tratamiento térmico con vapor reconocido por la NIMF 15, HT 56/30 ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$) en madera verde apilada de pino radiata. Los ensayos se realizaron en un horno convencional de 40 m^3 de capacidad (ensayo piloto), luego se realizaron algunas pruebas de validación en horno certificado y cámara de vaporizado de 100 m^3 de capacidad (ensayo industrial).

Ensayo piloto

Los ensayos experimentales fueron llevados a cabo en un horno industrial de 40 m^3 de capacidad en madera sólida, calefaccionado con vapor (Figura 1).



Figura 1: Horno de 40 m^3 para tratamiento de madera apilada (ensayo piloto).

En el horno se instaló una carga de 4 torres de madera de $1,9\text{ m} \times 1,1\text{ m} \times 4\text{ m}$ de largo, con escuadrías de $16\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 4\text{ m}$, $38\text{ mm} \times 96\text{ mm} \times 4\text{ m}$, $53\text{ mm} \times 83\text{ mm} \times 4\text{ m}$ con subpaquetes de 150 mm , 200 mm y 400 mm (Figura 2). Estas escuadrías son representativas de la madera utilizada en la industria nacional chilena para embalajes de exportación. La madera recién aserrada, se mantuvo en estado verde, húmeda y fría a la temperatura ambiente ($18\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$), antes de cada ensayo.

Cada subpaquete fue apilado con piezas de madera de 4 m de largo, combinando al azar la altura del subpaquete y espesor de la madera para trabajar con una temperatura de $80\text{ }^{\circ}\text{C}$, $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. El espaciado de cada subpaquete se realizó con separadores de 19 mm (Figura 2).

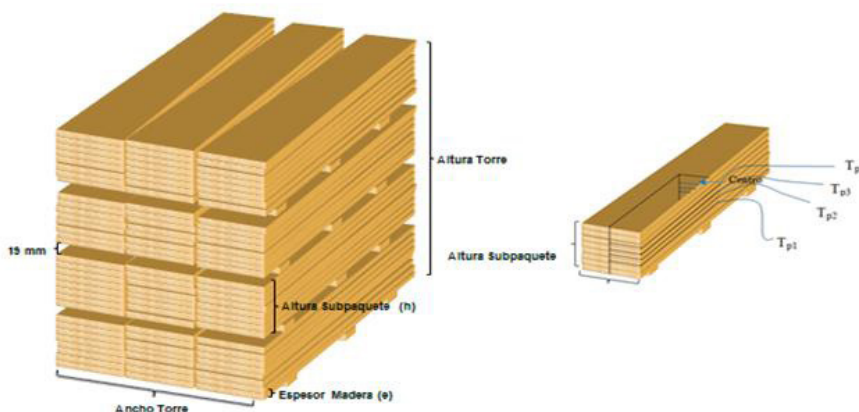


Figura 2: Esquema carga y disposición de termopar.

Las variaciones del espesor de la madera fueron de ± 1 mm. La variación de la altura del subpaquete fue de aproximadamente ± 10 mm.

Se determinó el tiempo cumplido que demora en calentar mediante vapor húmedo (ambiente saturado) el centro de la madera a $56\text{ }^{\circ}\text{C}$ por 30 minutos para diferentes niveles de temperatura, altura de subpaquetes y espesor de la madera. El tiempo cumplido de esterilización con calor para la condición 56/30 ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$), se controló como función de la temperatura de bulbo seco ($80\text{ }^{\circ}\text{C}$, $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $100\text{ }^{\circ}\text{C}$), la altura de subpaquetes (150 mm , 200 mm y 400 mm) y el espesor de la madera (16 mm , 38 mm y 53 mm).

El horno estaba equipado con 4 sensores de temperatura de bulbo seco y 1 sensor de temperatura de bulbo húmedo. Los sensores fueron debidamente calibrados. Un sistema de control PLC, permitió conducir y registrar de manera continua cada 1 minuto las condiciones ambientales al interior del horno: Temperatura de bulbo seco (Tbs) y temperatura de bulbo húmedo (Tbh). Para cada temperatura se aceptó una diferencia psicrométrica de $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Se implementó una base de datos de temperatura, para asegurar un sistema encriptado de estos datos. No se usó ventilación forzada, tal como usualmente se realiza este tratamiento en cámaras de vaporizado en la industria nacional, sino la aplicación de vapor húmedo mediante tina.

Se usaron 4 termopares tipo T, debidamente testeadas, para monitorear la temperatura de la madera en cada subpaquete. Los termopares se insertaron en el centro de las piezas centrales de cada subpaquete, mediante perforación y aislando con silicona de alta temperatura (Figura 3).



Figura 3: Instalación de termopares en subpaquete.

Un sistema de adquisición de datos de temperatura en base a PLC/multiplexores fue utilizado para registrar los datos cada 1 minuto, hasta cumplir el tiempo requerido para esterilizar la madera (tiempo cumplido 56/30 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$) (Figura 4).

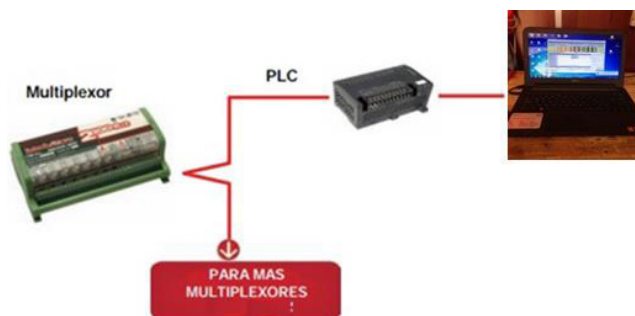


Figura 4: Sistema de adquisición de datos de temperatura en base a PLC/multiplexores.

El diseño experimental incluyó como factores de variación la temperatura ambiente (en 3 niveles), espesor de la madera (en 3 niveles) y altura del subpaquete (en 3 niveles). El diseño experimental considera combinaciones de 81 tratamientos tal como se describe en la Tabla 1.

Tabla 1: Diseño experimental.

Variable	Factor	Nivel	Réplica
Tiempo cumplido	Espesor madera (e)	3	3
	Altura subpaquete (H)	3	
	Temperatura (T)	3	

La influencia de los factores con el tiempo de esterilización fue determinada con un análisis multifactor (ANOVA, $p < 0,01$) y prueba de comparaciones múltiples (LSD) a un 99 % de nivel de confianza, para determinar diferencias significativas entre los niveles de cada factor. Para la predicción del tiempo de esterilización en función de los factores, se consideró un análisis de regresión múltiple por pasos hacia adelante, verificando la calidad de los modelos con análisis de bondad del ajuste, residuos y autocorrelación.

Ensayo industrial

Para la validación industrial, se realizaron ensayos en hornos de secado acreditados para realizar la esterilización con vapor y en una cámara de vaporizado certificada para realizar el tratamiento de esterilización con vapor HT (SAG 2006). Tres ensayos fueron realizados en tres plantas industriales chilenas, en donde para cada una de las temperaturas (80 °C, 90 °C, 100 °C) se varió espesor de la madera y altura del subpaquete. En este caso se usó la madera recién aserrada disponible en cada planta al momento de realizar los experimentos. En todos los casos se armó la carga en subpaquetes de 150 mm, 200 mm y 400 mm de altura tal como en el ensayo piloto (Figura 5a). Las variaciones del espesor de la madera fueron de ± 1 mm. La variación de la altura del subpaquete fue de aproximadamente ± 10 mm.



Figura 5: Instalaciones e instrumental para tratamientos industriales con vapor. (a) Horno secado certificado, (b) Cámara de vaporizado, (c) Sistema adquisición datos.

En los hornos de secado se controló la temperatura de bulbo seco (Tbs) y la temperatura de bulbo húmedo (Tbh), se aceptó una diferencia psicrométrica de ± 1 °C. La temperatura de bulbo húmedo tuvo una variación de ± 1 °C con la temperatura ambiente (temperatura de bulbo seco). Los datos de la Tbs y Tbh durante el proceso, fueron recogidos al final de cada ensayo del propio sistema de control de los hornos de secado y cámara de vaporizado. En la cámara de vaporizado, se controló la temperatura de bulbo seco. En los hornos de secado, no se usó ventilación forzada, tal como usualmente se realiza este tratamiento en cámaras de vaporizado en la industria nacional chilena. (Figura 5b)

Se instalaron 12 termopares debidamente probadas para combinaciones de espesores y altura, 4 termopares en piezas de madera ubicadas en el centro de cada subpaquete. El espaciamiento de cada subpaquete se realizó con separadores de 19 mm. La temperatura al interior de la madera fue registrada cada 1 minuto usando termopares tipo (T), las cuales fueron registradas en un sistema de adquisición de datos (Digi-Sense Scanning Thermometer). Se implementó una base de datos de temperatura para asegurar un sistema encriptado de estos datos. (Figura 5c).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Ensayo piloto

En la Figura 6, Figura 7 y Figura 8 se muestran la evolución de la temperatura interna de la madera para los programas de calentamiento con vapor a escala piloto con temperaturas 80 °C, 90 °C y 100 °C. La temperatura de la madera siempre se ubica por debajo de la temperatura ambiente, la temperatura de la madera comienza en el rango de 6 °C a 10 °C.

Se observa que los paquetes de 150 mm y 200 mm de altura alcanzan más rápidamente el tiempo cumplido de esterilización con vapor 56/30 (°C/min). El proceso es mucho más lento para una altura de 400 mm, incluso a 100 °C, la esterilización con vapor de estos paquetes de 400 mm de altura demora en completar el ciclo.

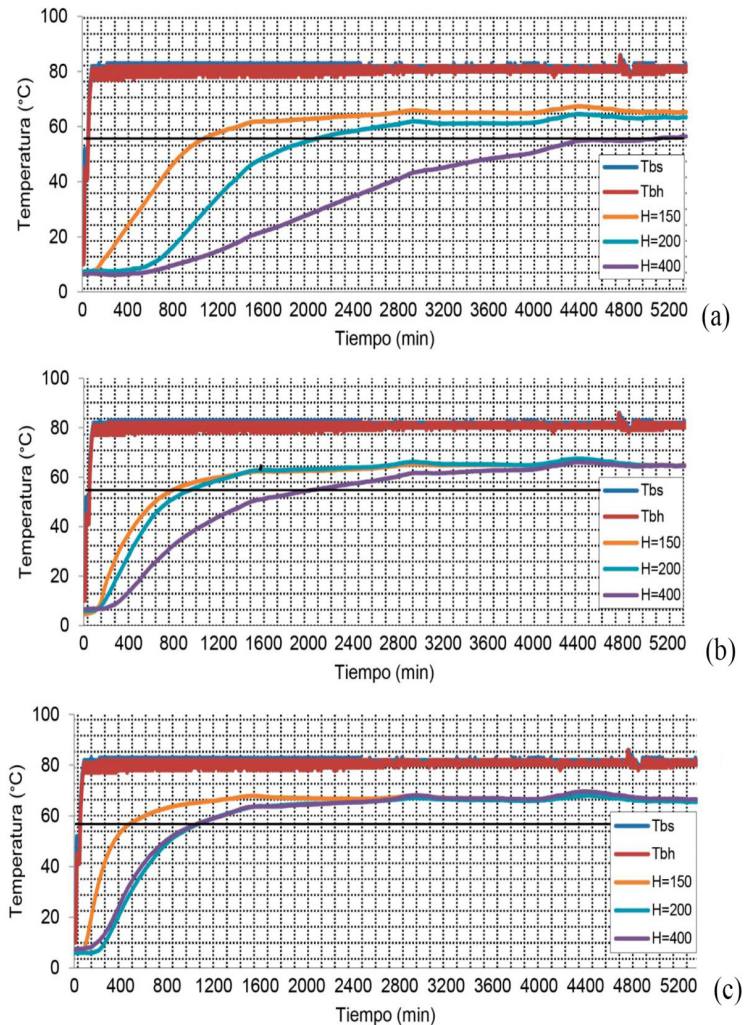


Figura 6: Evolución temporal de la temperatura ensayos a 80 °C. (a) 16 mm, (b) 38 mm, (c) 53 mm.

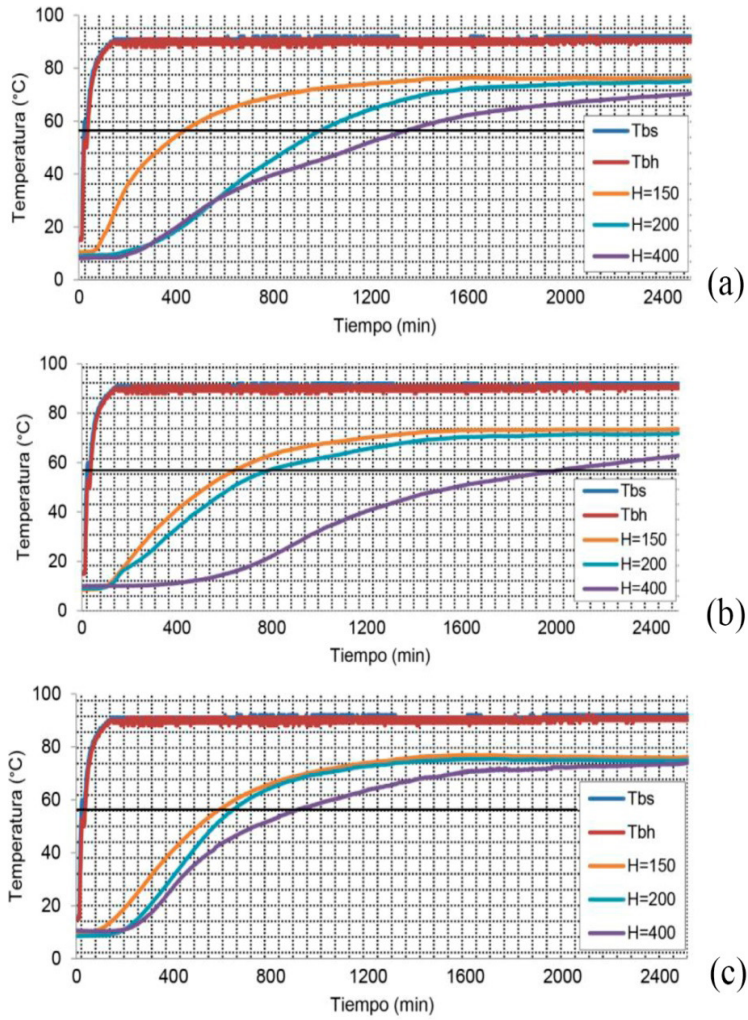


Figura 7: Evolución temporal de la temperatura ensayos a 90 °C. (a) 16 mm, (b) 38 mm, (c) 53 mm.

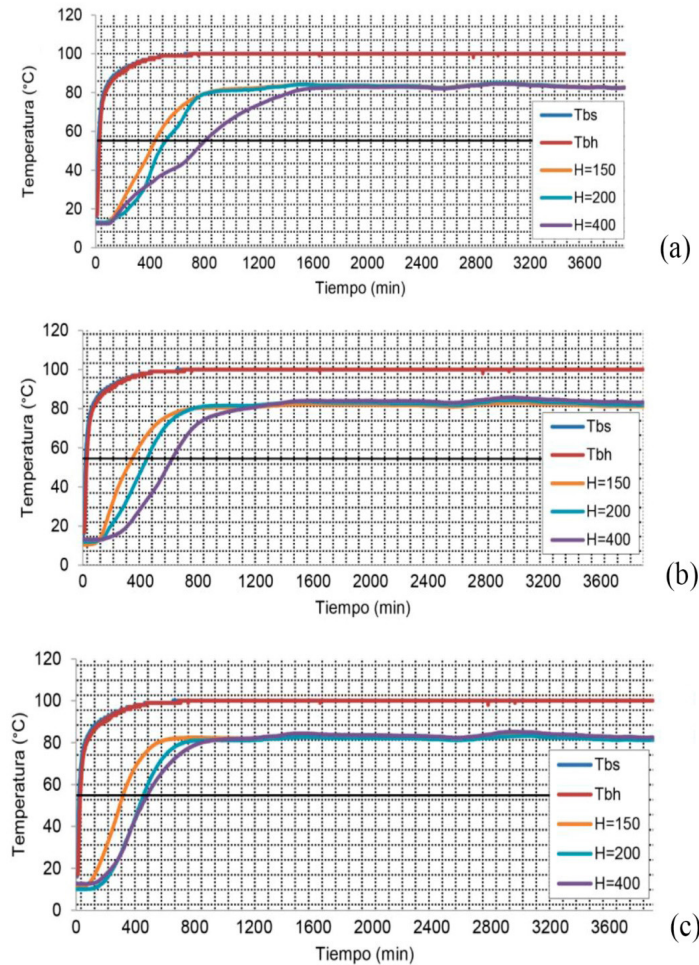


Figura 8: Evolución temporal de la temperatura ensayos a 100 °C. (a) 16 mm, (b) 38 mm, (c) 53 mm.

La Tabla 2 muestra los resultados experimentales del tiempo promedio mínimo requerido para que la madera cumpla con la combinación de 56/30 °C/min en el centro de la madera.

El tiempo mínimo varió desde 123 min hasta un máximo de 2275 min. Como se esperaba, de acuerdo con lo reportado por la literatura (Ananías y Venegas 2005, Simpson 2003, Simpson 2006, Simpson and Illman 2004, Simpson *et al.* 2005), el espesor de la madera apilada (sin empalillar) influencia significativamente los tiempos de esterilizado.

El tiempo de esterilización mínimo corresponde a la combinación de 100 °C, una altura del subpaquete de 150 mm y un espesor de la madera de 38 mm. El máximo corresponde a la temperatura de 80 °C, una altura del subpaquete de 400 mm y un espesor de la madera de 16mm. Una notable heterogeneidad del tiempo del tratamiento es observada en la misma Tabla 2. Esta heterogeneidad ha sido reportada en trabajos anteriores como consecuencia de la propia variabilidad del apilado de la madera sin empalillar, como también del contenido humedad inicial de la madera (Simpson *et al.* 2003, Simpson *et al.* 2005, Wang y Simpson 2020).

Tabla 2: Tiempo cumplido (min) tratamiento HT 56/30 °C/min.

Ensayo	150*			200			400			
	16**	38	53	16	38	53	16	38	53	
80°C-piloto	Media	740	558	332	1410	688	628	2275	2260	1080
	Desviación típica	96	6	16	48	68	17	204	461	377
	Error relativo (%)	4	1	1	1	3	1	3	6	10
90°C-piloto	Media	303	370	364	701	484	572	1732	1704	784
	Desviación típica	39	17	2	34	8	2	94	295	347
	Error relativo (%)	4	1	1	1	1	1	2	5	13
100°C-piloto	Media	160	123	288	323	149	214	524	310	279
	Desviación típica	10	11	1	39	7	67	69	106	47
	Error relativo (%)	2	3	1	3	1	9	4	10	5

*Altura del subpaquete: 150 mm, 200 mm, 400 mm

**Espesor de la madera: 16 mm, 38 mm, 53 mm

Comparaciones múltiples (prueba LSD 99 %)

La altura del subpaquete y el espesor de la madera resultaron tener una influencia en el tiempo de esterilización, en concierto con lo indicado por Simpson *et al.* (2005), Wang (2010), Wang y Simpson (2020). De acuerdo con la prueba de comparaciones múltiples presentado en la Tabla 3, se observan diferencias significativas en el tiempo cumplido de esterilización para alturas y espesores de la madera, a una temperatura dada.

Tabla 3: Prueba LSD 99 % nivel de confianza entre alturas del subpaquete (H) y espesor de la madera (e) para 80 °C, 90 °C y 100 °C.

T (°C)	80			90			100		
H (mm)	150	200	400	150	200	400	150	200	400
	a	b	c	a	a	b	a	a	b
e (mm)	16	38	53	16	38	53	16	38	53
	c	b	a	b	ab	a	b	a	ab

Letras iguales indican que no hay diferencias significativas entre alturas y espesores a una temperatura dada según prueba de LSD.

En particular, el tiempo de esterilizado presenta diferencias estadísticamente significativas entre las alturas del subpaquete de 150 mm, 200 mm y 400 mm, trabajando con una temperatura de 80°C. Así como usando 90 °C y 100 °C, con una altura de 400 mm.

En el caso de los espesores de la madera, existen diferencias estadísticas significativas entre 16 mm, 38 mm y 53 mm, usando temperatura de 80 °C. Sin embargo, para 90 °C las diferencias estadísticas significativas, se presentaron entre 16 mm y 53 mm. En tanto trabajando con 100 °C, las diferencias significativas se presentaron entre 16 mm y 38 mm.

En promedio, el tiempo de esterilización con vapor aumenta con la altura del subpaquete y disminuye con un aumento de la temperatura del vapor. El tiempo de esterilización con calor para una determinada temperatura y altura de subpaquete tiende a aumentar al reducir el espesor de la madera. Wang (2010) ha reportado estas mismas tendencias trabajando con madera apilada (sin empalillar).

Regresión múltiple

La variabilidad del tiempo de esterilizado de la madera apilada (Simpson 2003) y la heterogeneidad en los procesos y equipos de la industria maderera chilena, propician el desarrollo de modelos de acuerdo a la temperatura para predecir el tiempo cumplido de esterilización. En este contexto, Simpson *et al.* (2003), Simpson *et al.* (2005), Simpson (2006) y Wang y Simpson (2020), han indicado la buena capacidad de estimación del tiempo de esterilizado a través de modelos de regresión múltiple. Sin embargo, la calidad del ajuste para un modelo predictor con las variables temperatura, altura del subpaquete y espesor de la madera, resultó con un R² de 67 %, sin embargo, no predice valores lógicos para la temperatura de 100 °C y se ha desestimado como resultado.

De acuerdo con la ANOVA (Tabla 4), resulta para una temperatura de 80 °C, una regresión múltiple en función de la altura y el espesor con un R² de 84 %, tal como presentado en la Ecuación 1:

$$t_{80} = 561,8 + 5,2H - 20,9e \quad (1)$$

Para una temperatura de 90 °C la regresión múltiple alcanza un R² de 76,5 % y se expresa como descrito en la Ecuación 2:

$$t_{90} = 37,9 + 4,2H - 8,79e \quad (2)$$

La regresión resultante para 100 °C presenta un R² de 45 % y es representada por la Ecuación 3:

$$t_{100} = 167,7 + 0,72H - 2,4e \quad (3)$$

En cada uno de los modelos, el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0,05 por lo que, desde el punto de vista estadístico, existe una relación significativa entre altura del subpaquete y espesor de la madera. Con esto, la altura del subpaquete y el espesor de la madera, permiten predecir el tiempo cumplido de esterilización en un 84 % para 80 °C, 76 % para 90 °C y 45 % para 100 °C.

Tabla 4: ANOVA de los Modelos de Regresión Múltiple.

Temperatura (°C)	80	90	100
n experimental	108	108	108
n modelo	85	83	80
Valor p Modelo	0,0000	0,0000	0,0000
Valor p Constante	0,0014	0,8040	0,0034
Valor p Altura	0,0000	0,0000	0,0000
Valor p Espesor	0,0000	0,0051	0,0027
R ² (%)	84	76	45

n: tamaño muestral

Bondad de ajuste de los modelos

Coefficiente determinación r del modelo

Con un 99% de nivel de confianza, la variabilidad del tiempo correlacionado (datos esperados) para una temperatura de 80 °C y 90 °C se ajusta muy fuertemente al tiempo de esterilizado (datos experimentales) de acuerdo al coeficiente de regresión lineal $r=0,92$ y $r=0,88$ respectivamente; en tanto para 100 °C su ajuste es moderadamente fuerte ($r=0,69$). El error estándar resulto de 255 min para 80°C, 229 min para 90 °C y 63 min para 100 °C (Figura 9). En el mismo orden de grandeza, coeficientes de regresión lineal (r) entre 0,67 y 0,78 han sido reportados para estimar el tiempo de esterilizado de la madera. (Simpson *et al.* 2003 Wang y Simpson 2020).

Validación del modelo de regresión

El análisis de los residuos indica que los modelos ajustados son satisfactorios y cumplen los supuestos de la regresión: residuos normales, con varianza constante y sin correlación. Así mismo el estadístico de Durbin-Watson (DW=1,8 para 80 °C; 1,6 para 90 °C; 1,7 para 100 °C) y los residuos studentizados se encuentran dentro de lo esperado, para los tres modelos, con un valor menor a

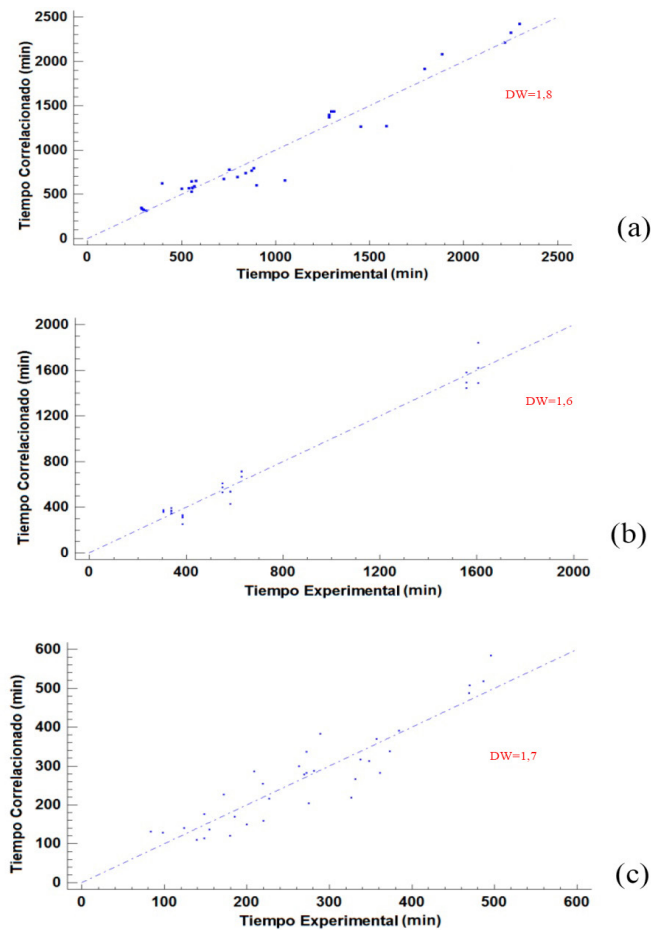


Figura 9: Grafico de residuos del tiempo de esterilizado correlacionado y tiempo esterilizado experimental para la temperatura de (a) 80 °C, (b) 90°C y (c) 100°C.

Ensayo industrial

La evolución temporal de la temperatura durante las pruebas del ensayo industrial se presenta en la Figura 10. El tiempo de esterilización con calor fue más rápido durante el ensayo industrial debido a las tecnologías de secado y vaporizado utilizadas, esto es hornos de secado y cámaras de vaporizado potenciadas térmicamente para madera de pino radiata. Igualmente, la temperatura inicial de la madera partió en el rango de 6 °C a 18 °C, más alta que para el ensayo piloto. Como dicho anteriormente, se observa que los paquetes de 150 mm y 200 mm de altura alcanzan más rápidamente el tiempo cumplido de esterilización con vapor 56/30 (°C/min). El proceso es mucho más lento para una altura de 400 mm, incluso a 100 °C la esterilización con vapor de estos paquetes de 400 mm de altura demoran en completar el ciclo.

La diferencia en la magnitud del tiempo de esterilización con calor probablemente sea atribuible a la tecnología utilizada y a las combinaciones de espesor y altura del subpaquete, tal como descrito por Simpson *et al.* (2003).

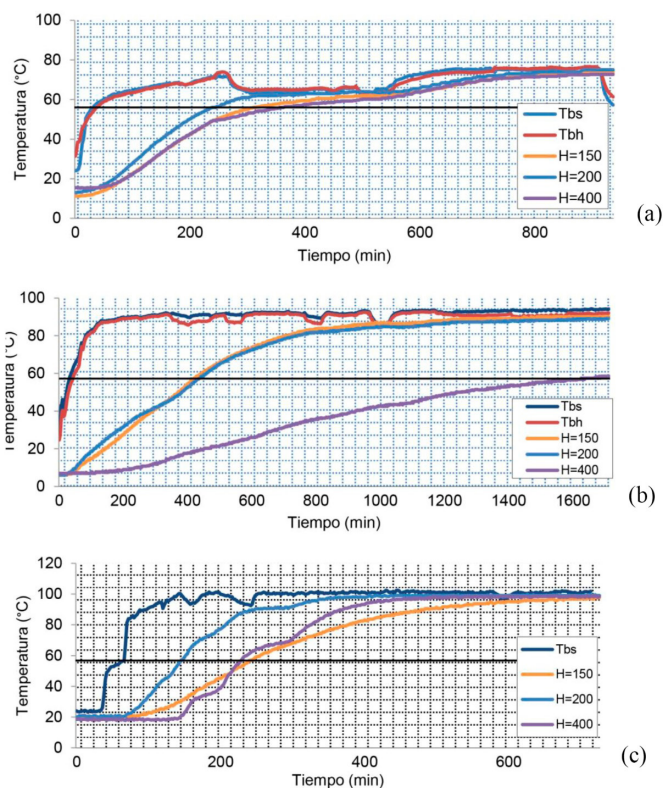


Figura 10: Evolución temporal de la temperatura durante ensayo industrial. (a) 80 °C (horno certificado), (b) 90 °C (horno certificado), (c) 100 °C (cámara certificada).

Al comparar los resultados industriales con las correlaciones por cada temperatura encontradas durante el ensayo piloto (Correlación Apilado), se observa que el tiempo de esterilización con vapor es generalmente sobrestimado por dichas correlaciones, el efecto es más notable a una temperatura de 100 °C (Tabla 5).

Igualmente en la Tabla 5, se comparan los datos experimentales con la relación empleada por Ananías y Venegas (2005) para predecir el tiempo de esterilización durante el proceso de homologación del secado de pino radiata (Correlación Secado). Se observa que a 80 °C y 90 °C la correlación usando la homologación del secado subestima el tiempo de esterilización con vapor de la madera apilada de pino radiata. En cambio a 100 °C la correlación del secado sobrestima el tiempo de esterilización con vapor de pino radiata apilado.

Tabla 5: Comparación del tiempo cumplido (min) de esterilización con vapor durante ensayos experimentales, correlación madera apilada (presente trabajo) y correlación secado (Ananías y Venegas 2005).

Ensayo	150			200			400		
	16	38	53	16	38	53	16	38	53
80 °C - piloto	740	558	332	1410	688	628	2275	2260	1080
80 °C - corr apilado	1003	542	228	1261	801	487	2295	1835	1521
80 °C - corr secado		302			387			727	
90 °C - piloto	303	370	364	701	484	572	1732	1704	784
90 °C - corr apilado	530	339	208	740	549	419	1581	1390	1259
90 °C - industrial		212			228			1374	
90 °C - corr secado		294			379			719	
100 °C - piloto	160	123	288	323	149	214	524	310	279
100 °C - corr apilado	238	222	151	274	186	187	418	366	330
100 °C - industrial	152					58			140
100 °C - corr secado		286			371			711	

80-corr apilado: $t=561,8+5,2H-20,9e$; 90-corr apilado: $t=37,9+4,2H-8,7e$; 100-corr apilado: $t=167,7+0,72H-2,4e$;

Corr Secado: $t=109,3-0,78T+1,7e$;

Altura del subpaquete: 150 mm, 200 mm, 400 mm; Espesor de la madera: 16 mm, 38 mm, 53 mm.

CONCLUSIONES

La evolución temporal de la temperatura en madera verde apilada de pino radiata usando vapor a una temperatura entre 80 °C y 100 °C depende significativamente de la altura del subpaquete y del espesor de la madera.

El tiempo para obtener las condiciones de esterilización con vapor de madera apilada de pino radiata, varió de 123 min (38 mm de espesor de la madera, 150 mm altura del subpaquete y 100 °C de temperatura) hasta un máximo de 2275 min (16 mm de espesor de la madera, 400 mm altura del subpaquete y 80 °C de temperatura). El menor tiempo de esterilización de pino radiata apilado para embalajes de exportación resulta de la combinación de una temperatura del vapor a 100 °C, apilado con una altura del paquete de 150 mm y usando un espesor de la madera de 38 mm.

A partir de las variables altura del subpaquete y el espesor de la madera, es factible predecir el tiempo cumplido de esterilización en un 84 % para 80 °C, 76 % para 90 °C y 45 % para 100 °C.

Los resultados son aplicables a la industria nacional chilena que procesa madera aserrada de pino radiata verde empaquetado para embalajes de exportación.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el financiamiento del proyecto de investigación Fondef-Idea 2-etapas ID14I10231.

REFERENCIAS

Ananías, R.A.; Venegas, R.; Salvo, L.; Elustondo, D. 2013. Kiln Schedule certification for industrial drying of radiata pine. *Wood Fiber Sci* 45(1): 98-104. <https://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/view/390/390>

Ananías, R.A.; Venegas, R. 2005. Secado industrial del pino radiata: Tiempo de esterilización con calor y evolución temporal de la temperatura. *Maderas-Cienc Tecnol* 7(3): 179-188. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2005000300003>

Arcos, S.C.; Robertson, L.; Conde, M.; Llinares, F.; Navas, A.; Troya, M.T. 2015. Efficacy of commercial wood preservatives against *Bursaphelenchus xylophilus*, a quarantine organism in Europe. *Eur J Wood Prod* 73: 643-649. <https://doi.org/10.1007/s00107-015-0933-x>

Carnegie, A.J.; Venne, T.; Lawsonc, S.; Nagela, M.; Wardlawd, T.; Cameron, N.; Laste, I. 2018. An analysis of pest risk and potential economic impact of pine wilt disease to *Pinus* plantations in Australia. *Aust For* 81(1): 24-36. <https://doi.org/10.1080/00049158.2018.1440467>

Chen, Z.; White, M.S.; Mack, R.; Qiu, Z. 2018. Steam and vacuum treatment of large timber in solid wood skids. *BioResources* 13(4): 9132-9142. <https://doi.org/10.15376/biores.13.4.9132-9142>

Douda, D.; Zouhar, M.; Manasova, M.; Dlouhy, M.; Liskova, J.; Rysanek, P. 2015. Hydrogen cyanide for treating wood against pine wood nematode (*Bursaphelenchus xylophilus*): results of a model study. *J Wood Sci* 61(2): 204-210. <https://doi.org/10.1007/s10086-014-1452-9>

Haack, R.A.; Britton, K.O.; Brockerhoff, E.G.; Cavey, J.F.; Garrett, L.J.; Kimberley, M.; Lowenstein, F.; Nuding, A.; Olson, L.J.; Turner, J.; Vasilaky, K.N. 2014. Effectiveness of the International Phytosanitary Standard ISPM No. 15 on Reducing Wood Borer Infestation Rates in Wood Packaging Material Entering the United States. *PlosOne* 9(5): e96611. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0096611>

Haack, R.A.; Uzunovic, A.; Hoover, K.; Cook, J.A. 2011. Seeking alternatives to probit 9 when developing treatments for wood packaging materials under ISPM N° 15. *Eppo Bull* 41(1): 39-45. https://www.ippc.int/static/media/files/publications/en/2013/06/05/1347892129_2011_IFQRG-9-17_Haack_et_al_201.pdf

Leal, I.; Alle, E.; Humble, L.; Sela, S.; Uzunovic, A. 2010. Phytosanitary risks associated with the global movement of forest products: A commodity-based approach. Canadian Forest service, Pacific Forestry Center Information: Victoria, British Columbia, Canada. Report BC-X-419. 42p. <https://cfs.nrcan.gc.ca/pubwarehouse/pdfs/32149.pdf>

Mausel, D.L.; Gara, R.L.; Lanfranco, D.; Ruiz, C.; Ide, S.; Azat, R. 2007. The introduced bark beetles *Hylurgus ligniperda* and *Hylastes ater* (Coleoptera: Scolytidae) in Chile: seasonal flight and effect of *Pinus radiata* log placement on colonization. *Can J For Res* 37(1): 156-169. <https://doi.org/10.1139/x06-215>

MBTOC. 2018. Methyl bromide technical options committee. 2018 Assessment report. United Nations Environment Programme, Ozone Secretariat: Nairobi, Kenya. 50p. https://ozone.unep.org/sites/default/files/2019-04/MBTOC-assessment-report-2018_1.pdf

Morrell, J.J. 1995. Importation of unprocessed logs into north America: A review of pest mitigation procedures and their efficacy. *Forest Prod J* 45(9): 41-50.

Naves, P.; Inácio, M.L.; Nóbrega, F.; Sousa, E.; Michielsen, M. 2019. Pinewood nematode presence and survival in commercial pallets of different ages. *Eur J Wood Prod* 77: 301-309. <https://doi.org/10.1007/s00107-019-01383-1>

Normas Internacionales para medidas fitosanitarias. NIMF. 2019. Reglamentación del embalaje de madera utilizado en el comercio internacional. NIMF 15. FAO. 22 p. https://www.ippc.int/static/media/files/publication/es/2019/05/ISPM_15_2018_Es_PostCPM-13_LRGRRev_2019-05-27.pdf

SAG. 2006. Reglamento específico para la acreditación de terceros en la ejecución de tratamientos y timbrado de maderas y de embalajes de maderas de exportación. Servicio Agrícola y Ganadero. REA-AGR- 01-v02. 69p. http://www.sag.cl/sites/default/files/reglamento_acredit_embalajesmadera1.pdf

Simpson, W.T. 2003. Mechanism responsible for the effect of wet bulb depression on heat sterilization of slash pine lumber. *Wood Fiber Sci* 35(2): 175-186. <https://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/view/160/160>

Simpson, W.T.; Wang, X.; Verrill, S. 2003. Heat sterilization time of ponderosa pine and Douglas-fir boards and square timbers. Research paper FPL-RP-607. US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory: Madison, WI, USA. 24 p. <https://doi.org/10.2737/FPL-RP-607>

Simpson, W.T.; Illman, B.L. 2004. Heat sterilization time of red pine boards. *Forest Prod J* 54(12): 29-32. https://www.fpl.fs.fed.us/documnts/pdf2004/fpl_2004_simpson003.pdf

Simpson, W.T.; Wang, X.; Forsman, J.W.; Erickson, J.R. 2005. Heat sterilization times of five hardwood species. Res. Pap. FPL-RP-626. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory: Madison, WI, USA. 10 p. https://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplrp/fpl_rp626.pdf

Simpson, W.T. 2006. Estimating heating times of wood boards, square timbers and logs in saturated steam by multiple regression. *Forest Prod J* 56(7-8): 26-28. <https://www.fs.usda.gov/treearch/pubs/25160>

Wang, X. 2010. Heat sterilization of wood. En *Wood handbook: wood as an engineering material*. General Technical Report FPL; GTR-190. US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory: Madison, WI, USA. 14 p. https://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplgtr/fplgtr190/chapter_20.pdf

Wang, X.; Simpson, W.T. 2020. Drying and Heat Sterilization of Hardwood Lumber for Structural Uses. En: *Undervalued Hardwoods for Engineered Materials and Components*. General Technical Report FPL-GTR-276. US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory: Madison, WI, USA. 108 p. https://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplgtr/fpl_gtr276.pdf#page=45