

1

PROGRAMA DE PROMOCIÓN DE EXPORTACIONES DE PRODUCTOS DE MADERA

Dirección Nacional de Industrias
Ministerio de Industrias, Energía y Minería
Consejo Sectorial Forestal-Madera

Andrés Dieste
Montevideo, Diciembre 2012

Tabla de contenidos

1.	Introducción al Programa de Promoción de Exportaciones de Productos de Madera	2
2.	Acción 1: Cuantificación del recurso forestal en base a datos existentes	5
2.1.	Introducción	5
2.2.	Objetivo	5
2.3.	Metodología	5
2.4.	Resultados	8
3.	Acción 4: Identificación de productos que requieren innovación	12
3.1.	Introducción	12
3.2.	Recomendación	13
3.2.	Objetivos	13
3.3.	EEM con calidad estructural y EEM para carpintería y mueble	17
3.4.	Normativa para vigas de MLE de calidad estructural	18
4.	Acción 5: Introducción de nuevas tecnologías de procesamiento de la madera	20
4.1.	Introducción	20
4.2.	Recomendación	20
4.3.	Objetivos	21
4.4.	Durabilidad natural de especies de uso industrial local	21
4.5.	Secado	22
4.6.	Protección por diseño	23
4.7.	Impregnación en profundidad	24
4.8.	Modificación	26
5.	Referencias	29



El siguiente informe se realizó a solicitud de la Dirección Nacional de Industrias - Ministerio de Industria, Energía y Minería en el marco del Consejo Sectorial Forestal-Madera. La información que aquí se presenta es responsabilidad del autor.

Puntos a destacar

- Para el período 2010-2030 se estima la siguiente oferta anual promedio de madera en rollo:
 - 14,2 millones de m³ (11,2 y 3,0 millones de m³ para eucalipto y pino, respectivamente)
 - 10,0 millones de m³ destinada a celulosa
 - 4,2 millones de m³ destinada a transformación mecánica (3,0 y 1,2 millones de m³ para pino y eucalipto, respectivamente).
- La industria de celulosa local tendrá un consumo mínimo de 8 millones de m³, por lo que no se anticipa un traslado desde la industria de la celulosa a la de transformación mecánica
- La capacidad industrial instalada para transformación mecánica se estima en 1,4 millones de m³ (720.000 y 695.000 m³ para pino y eucalipto, respectivamente). Aun si ésta se duplicara, resultaría insuficiente para procesar la madera de pino disponible.
- El producto que requiere innovación es la madera aserrada. Se recomienda desarrollar elementos encolados de madera maciza, tales como madera laminada encolada y paneles.
- Existe la necesidad de incorporar normativa de fabricación, control de calidad y cálculo de madera estructural para promover la venta local e internacional de productos de mayor valor agregado.
- Dado que las especies cultivadas en Uruguay son de baja durabilidad natural, se recomienda la introducción y el desarrollo de nuevas tecnologías orientadas a aumentar la durabilidad de la madera (secado, protección por diseño, impregnación en profundidad y modificación).
- Necesidad de regular la aplicación de biocidas de amplio espectro como el CCA en la impregnación de madera.

1. Introducción al Programa de Promoción de Exportaciones de Productos de Madera

Actualmente el área forestal mundial está declinando. Entre 1990 y 2010 la tasa de deforestación fue de 6,7 millones de hectáreas anuales, con un descenso en la superficie de 4.168 a 4.033 millones de hectáreas, respectivamente (FAO 2011). Esto significa que se incrementa la importancia de las plantaciones forestales como proveedoras de fibra. Se estima que 50 millones de hectáreas de bosques cultivados de alta productividad, tales como las especies cultivadas en Uruguay, podrían satisfacer la demanda global de fibra de madera (Diesen 2007). Asimismo, estimaciones del área forestal disponible, en función del consumo global per cápita, indican que la superficie dedicada al recurso forestal no será suficiente para mantener el actual consumo de madera (Hill 2006) (Tabla 1).

Tabla 1. Crecimiento forestal, consumo de madera y área forestal disponible (Hill 2006)

Crecimiento forestal anual	1,5 m ³ ha ⁻¹
Consumo de madera per cápita anual	0,5 m ³
Área forestal per cápita para permitir ese consumo	0,4 ha
Área forestal per cápita disponible en 2000	0,6 ha
Área forestal per cápita disponible en 2100	0,3 ha

El presente informe no pretende dar una perspectiva de escasez de madera. Los desarrollos tecnológicos, tanto en la producción del recurso forestal como en su transformación más eficiente, seguramente den solución al desafío de la disminución de la superficie forestal (Hill 2006). Sin embargo, es información útil al momento de proyectar a nivel global la demanda futura de madera.

En 2010 los bosques del mundo produjeron 3.400 millones de metros cúbicos de madera. El destino de la madera se puede dividir en los siguientes grandes grupos: 1) combustible; 2) construcción; 3) celulosa. El primer grupo reúne la madera que tendrá como destino la producción de energía como combustible; en 2010 representó el 55% del volumen mundial. El segundo grupo incluye a los productos de madera destinados a la construcción y la carpintería, y el tercer grupo es la madera utilizada como insumo para la producción de pasta de celulosa. En 2010 estos dos últimos grupos representaron el 25% y el 16% del total de la madera producida mundialmente, respectivamente. El restante 4% es la madera destinada a otros fines, como son la producción de taninos, destilación, postes para cercas, etc. (FAO 2012).

La madera destinada a la construcción se utiliza para la fabricación de componentes de viviendas, encofrados, puentes, cubiertas, etc. Incluye además a la madera destinada a fabricar productos de carpintería que estarán a la vista del consumidor final, tales como muebles, puertas y ventanas, suelos, etc.¹ Este grupo de madera es el que presenta mayor valor comercial y también el que tiene mayor valor agregado. Asimismo, la fabricación de productos de madera consume menos energía que la de materiales de uso alternativo, tales como yeso, metal, plástico, hormigón, etc. Dentro de los productos de madera, los de madera maciza requieren menos energía que los de partículas (Forest Products Laboratory 2010).

Un rápido análisis del consumo de madera de construcción en el mundo, simplificado en dos productos, la madera aserrada y los tableros de madera, permite advertir que es probable

¹En Uruguay la madera destinada a construcción y a carpintería se conoce como madera sólida, en oposición a la madera para producción de celulosa. Este informe utilizará el término "madera maciza", para los productos de madera aserrada y encolada, ya sea en forma de paneles o vigas, en consonancia con la jerga técnica internacional.

que el consumo de madera crezca. El consumo de estos productos es alto en las regiones más ricas del mundo; consecuentemente, a medida que el crecimiento económico se extienda a otras regiones, aumentará el consumo de madera. Como información adicional, el consumo de madera de Uruguay es bajo, tanto en comparación con las regiones más ricas del mundo como con Sudamérica y el Caribe. El bajo consumo local indica que existe espacio de crecimiento (Tabla 2) (FAO 2012).

Tabla 2. Consumo per cápita de madera aserrada y de tableros de madera (FAO 2012)

Consumo per cápita	Madera aserrada (m³)	Tableros de madera (m³)
Mundo	0,057	0,041
África	0,016	0,004
Norteamérica	0,258	0,139
Europa	0,148	0,099
Asia	0,030	0,033
Oceanía	0,202	0,079
Sudamérica y el Caribe	0,112	0,042
Uruguay	0,072	0,024

El Plan de Acción Integral del Consejo Sectorial Forestal-Madera (CSFM) tiene como primer objetivo “fomentar inversiones que promuevan la producción de derivados de la madera con mayor valor agregado y que profundicen la diversificación productiva” (Ministerio de Industria, Energía y Minería 2012). Dentro de este objetivo, este informe contribuye a la primera meta, la diversificación de exportaciones de productos derivados de la madera, concentrada en productos de madera para la construcción, tales como madera aserrada, contrachapados y productos de ingeniería de la madera. La primera herramienta de esa meta es el Programa de Promoción de Exportaciones de Productos de Madera y de Captación de Inversiones, para el que se definen las siguientes acciones:

- 1) Cuantificación del recurso forestal en base a datos existentes
- 2) Definición de productos de madera
- 3) Análisis del inventario nacional de industrias de primera transformación
- 4) Identificación de productos que requieren innovación
- 5) Introducción de nuevas tecnologías de procesamiento de madera

Este informe se concentrará en las acciones 1), 4) y 5).

La discusión de políticas para la promoción de la exportación de productos de transformación mecánica derivados de la madera requiere definir los siguientes parámetros: especies a procesar, volumen de madera disponible, capacidad industrial instalada, tecnología y productos.

La industria de la madera se divide en transformación primaria y secundaria. La primera consiste en la transformación mecánica de la troza a un producto intermedio, tales como tablas, postes, chapas, partículas, etc. La segunda consiste en utilizar la materia prima transformada para fabricar nuevos productos tales como tableros, componentes de muebles, vigas de madera laminada encolada, paneles, etc. Ambas etapas industriales tienen escaso desarrollo en Uruguay.

En 2011, Uruguay exportó más de 500 millones de U\$S de productos de madera, 80% de los cuales corresponden a madera en rollo y chips destinados a la producción de celulosa. La madera en rollo se exporta principalmente a la planta de UPM en Fray Bentos, lo que hace que Uruguay sea el quinto exportador de madera en rollo del mundo (FAO 2012). El restante 20% son exportaciones de productos de madera para la construcción,

fundamentalmente madera aserrada y tableros contrachapados. También se exportaron unos 9 millones de U\$S de tableros de densidad media (MDF) (Tabla 3).

Tabla 3. Exportaciones del sector forestal de Uruguay en 2011

Producto	Exportaciones FOB 2011 (U\$S)	%
Madera en rollo	253.271.647	48
Chips	165.689.914	32
Madera aserrada	49.763.389	10
Tableros contrachapados	44.179.469	8
Tableros de fibras	9.097.584	2

La evolución de las exportaciones indica que tanto la madera aserrada como los tableros contrachapados vienen en aumento luego de la caída en 2009 debido a la crisis internacional. Esta recuperación aún no se observa en la incipiente industria del MDF (Figura 1).

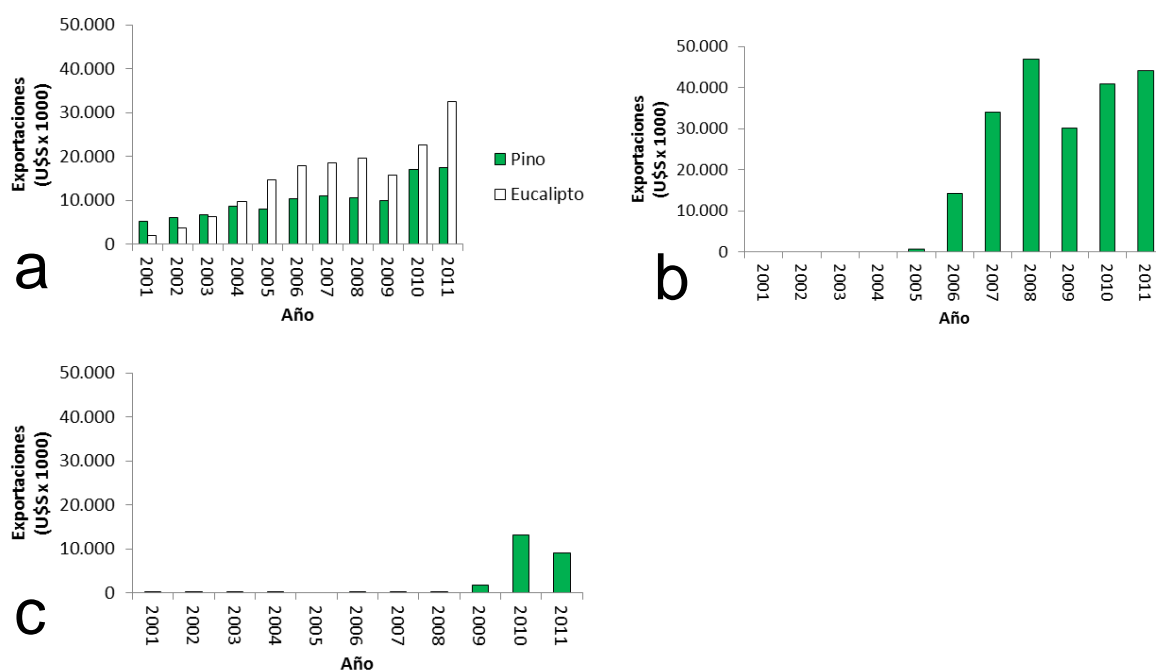


Figura 1. a) Exportaciones de madera aserrada, b) tableros contrachapados y c) tableros de fibra de densidad media MDF (Uruguay XXI 2012).

Por lo tanto, el éxito del primer objetivo del Programa de Promoción de Exportaciones del Productos de Madera del CSFM se reflejará en aumentar los aproximadamente 100 millones de U\$S de productos de madera de transformación mecánica que se exportaron en 2011 (Tabla 3).

2. Acción 1: Cuantificación del recurso forestal en base a datos existentes

2.1. Introducción

En 2012 existen en Uruguay más de 800.000 ha de bosques cultivados con destino industrial (MGAP 2012). Gran parte de esa superficie está ligada a la producción de celulosa. Considerando la especie plantada y la ubicación del proyecto forestal en el territorio, se puede estimar que al menos el 58% de la superficie forestada con fines industriales está destinada a la producción de celulosa. Por lo tanto, dado que este informe tiene como objeto la promoción de la exportación de productos de madera de transformación mecánica, se cuantificó el volumen de madera que generará el restante 42% de la superficie forestada.

La presente estimación se realizó a partir de la superficie por especie, el crecimiento de las especies y los ciclos forestales, considerando las operaciones de raleo² y tala rasa³. De esta manera, se construyó una proyección del flujo de materia prima para la industria maderera. Esta estimación asumió diversos supuestos para generar información sobre volúmenes de materia bruta, especies, ubicación geográfica del recurso y dimensiones de la madera. No pretende ser una cuantificación definitiva del flujo de madera disponible para la industria, sino una herramienta para orientar la promoción de exportaciones de productos de madera de transformación mecánica.

2.2. Objetivo

Cuantificar el flujo de la oferta de madera con destino industrial en Uruguay considerando dos destinos: producción de celulosa y producción de madera para construcción y carpintería. Como información complementaria, se presenta el volumen de madera que se genera en todo el ciclo del cultivo forestal, incluyendo raleos y cosecha final.

2.3. Metodología

La estimación de la oferta de madera disponible se basó en información de acceso público. Se priorizó la información publicada en fuentes referenciadas a las comunicaciones personales.

El cálculo empleado consistió en multiplicar la superficie ingresada por proyecto de explotación forestal presentado en la Dirección General Forestal del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca (DGF) por una tasa de crecimiento anual de volumen por unidad de superficie, conocida como incremento medio anual (IMA), obtenida de información pública. Para ello se agruparon las especies por características silvícolas y se asignaron para cada grupo destinos de producción y ciclos forestales. Este trabajo se basó en una serie de supuestos que se presentan enumerados a continuación.

1. Se estima el volumen de madera en rollo sin corteza destinado a la industria y no al total de biomasa forestal generada.

²Raleo: tipo de cosecha forestal que consiste en retirar parte de los árboles de la plantación para así disminuir la competencia y mejorar las condiciones de crecimiento de los árboles remanentes. Los raleos se dividen en comerciales y no comerciales de acuerdo al valor de mercado de los árboles retirados. Generalmente, en esta operación se retiran los árboles de peor geometría, favoreciendo el crecimiento de los árboles más aptos para el procesamiento industrial.

³Tala rasa: apeo de toda la masa forestal al fin del ciclo.

2. Se considera la superficie de cultivos forestales ingresados en proyectos a la DGF MGAP hasta diciembre de 2010. Es la información está disponible al momento de la redacción de este informe en la página web de la institución (www.mgap.gub.uy) y está limitada por la actualización de los proyectos.

De un total de 839.446 ha de proyectos ingresados, esta estimación consideró solamente 814.297 ha. Esto se debe a que algunos de los proyectos no definen las especies utilizadas o las presentan como una mezcla de géneros, y por lo tanto no se les puede asignar una tasa de crecimiento. Dado que existen pocos elementos para estimar la expansión del área forestal por fuera de la información disponible en la DGF, este trabajo no la considera. La superficie declarada en los proyectos es la total, e incluye cortafuegos, vías forestales, áreas reservadas, etc. La superficie efectiva representa aproximadamente el 70% de la superficie total del proyecto (Echeverría 2012). Sin embargo, este valor no puede aplicarse directamente como un factor de corrección, ya que la utilización de la tierra es variable en cada proyecto.

Se toman en cuenta exclusivamente los géneros de eucalipto y pino, ya que entre ambos concentran el 99,6% de la superficie forestada entre 1990 y 2010 (MGAP 2012).

La información disponible en la base de datos de proyectos forestales del MGAP es detallada en cuanto a especies, pero la falta de información respecto al crecimiento de cada especie obliga a agruparlas. Los criterios fueron la similitud de sus características silviculturales y su destino industrial (Tabla 1).

Tabla 4. Grupo de especies forestales y el destino asignado

Grupo	Especie	Destino
Eucalipto grandis	<i>Eucalyptus grandis</i>	Celulosa y madera de transformación mecánica
	<i>E. saligna</i>	
	<i>E. grandis</i> + <i>E. saligna</i>	
	<i>E. grandis</i> + <i>E. maidenii</i>	
Eucalipto globulus	<i>E. globulus</i> ssp. <i>globulus</i>	Celulosa
	<i>E. globulus</i> ssp. <i>maidenii</i>	
	<i>E. globulus</i> ssp. <i>globulus</i> + <i>E. globulus</i> ssp. <i>maidenii</i>	
<i>E. dunnii</i>	<i>E. dunnii</i>	Celulosa
<i>E. maidenii</i>	<i>E. maidenii</i>	
<i>E. viminalis</i>	<i>E. viminalis</i>	
Pino	<i>Pinus taeda</i>	Madera de transformación mecánica
	<i>P. elliotii</i>	
	<i>P. pinaster</i>	
	<i>P. radiata</i>	
	<i>P. taeda</i> + <i>P. elliotii</i>	
	<i>P. elliotii</i> + <i>P. pinaster</i>	
	<i>P. canariensis</i>	
<i>P. sp.</i>		

3. Se suponen dos destinos para la producción de madera: celulosa y madera de transformación mecánica. Al primer destino se le asignó toda la madera del género eucalipto, con excepción del grupo *E. grandis* cultivado en los departamentos de Tacuarembó, Rivera y Cerro Largo, mientras que al segundo destino se le asignó toda la madera de pino más el grupo *E. grandis* cultivado en los departamentos de Tacuarembó, Rivera y Cerro Largo.

4. Se asume que toda de la madera de pino tendrá como destino la producción de madera de transformación mecánica, en tanto actualmente no existe en Uruguay consumo de madera de pino para la producción de celulosa. En este punto la estimación sería más precisa si considerara parte de la madera del grupo *E. grandis* cultivada en los

departamentos de Paysandú y Río Negro como destinada a la producción de madera para transformación mecánica (Morás 2012). Sin embargo, dada la dificultad de separar la superficie forestada del grupo *E. grandis* en ambos destinos (celulosa y madera de transformación mecánica), se decidió asignar el destino de producción de celulosa a toda la superficie cultivada en esos departamentos con ese grupo (Tabla 5).

5. Para la producción de celulosa se cuantifican los rollizos de eucalipto sin corteza con un diámetro mínimo de utilización de 5 cm. Para la producción de madera maciza se considera un diámetro mínimo de utilización de 8 cm para el grupo *E. grandis* y 15 cm para el grupo Pino. La estimación de *E. grandis* surge de un modelo de crecimiento forestal que calcula el volumen por hectárea, pero que no realiza una optimización del troceado (Hirigoyen 2012, Scoz 2012).

Se estima que el 40% del volumen se destinará a transformación mecánica, mientras que el restante 60% se colocará como madera para producción de celulosa, en un contexto de mercado demandante. Para el caso del pino la descripción disponible es más detallada, ya que los trabajos de Bussoni y Cabris (2006; 2010) para *Pinus taeda*, en los que está basada esta estimación, presentan un troceado optimizado de los árboles. Para cada región forestal del país, se definen tres categorías de acuerdo al diámetro y al largo, a saber: A) diámetro apical mínimo 12-15 cm y largo 2,4 m; B) diámetro apical mínimo 15-20 cm y largo 2,4 m; C) diámetro apical mínimo 23 cm y largo 3,3 a 4,5 m. El presente trabajo estima para la región Centro-Sur una producción similar a la de la región Litoral (Tabla 5).

El país se dividió en tres regiones de producción forestal: Centro Sur (Canelones, Cerro Largo, Colonia, Durazno, Flores, Florida, Lavalleja, Maldonado, Montevideo, Rocha, San José, y Treinta y Tres), Litoral (Artigas, Paysandú, Río Negro, Salto y Soriano) y Noreste (Rivera y Tacuarembó). Al departamento de Cerro Largo se le asignó un incremento medio anual de los grupos *E. globulus* y *E. grandis* igual al de la región Noreste (Tabla 5).

6. Para la producción de celulosa se asumió un ciclo forestal de 10 años, mientras que para la producción de madera de transformación mecánica se consideró un ciclo de 20 y 24 años para los grupos *E. grandis* y Pino, respectivamente. Asimismo, se obtuvo el incremento medio anual y las extracciones de raleos comerciales y cosechas finales. Se utilizó el menor incremento medio anual disponible (Tabla 5).

Tabla 5. Estimación de cosecha forestal para dos destinos: producción de celulosa y de madera de transformación mecánica (Bussoni y Cabris 2006, 2010; Hirigoyen 2012; UPM, Forestal Oriental 2010)

Madera sin corteza			Año								IMA (m ³ /ha/año)		Fuente	
Destino	Género	Especie Región	0	5	10	13	15	16	20	24	Mínimo	Máximo		
Celulosa	Eucalipto	<i>grandis</i>	NE			260,0						26,0	34,0	
			Litoral			240,0						24,0	32,0	
			Centro Sur			220,0						22,0	28,0	
		<i>dunnii</i>	NE				240,0						24,0	30,0
			Litoral				200,0						20,0	28,0
			Centro Sur				220,0						22,0	26,0
		<i>globulus</i>	NE				150,0						15,0	20,0
			<i>viminialis</i> Litoral				150,0						15,0	20,0
			Centro Sur				180,0						18,0	24,0
			NE				70,0						7,0	11,0
			Litoral				70,0						7,0	12,0
			Centro Sur				120,0						12,0	18,0
Madera de transformación mecánica	Eucalipto	<i>grandis</i>	NE			16,2			77,5		527,5	31,1	Hirigoyen 2012	
			NE			35,9			118,1		164,0	13,3	Bussoni y Cabris 2010	
	Pino	Litoral			0,0	43,0			44,0		133,0	9,2	Bussoni y Cabris 2006	
		Centro Sur			0,0	43,0			44,0		133,0	9,2	Estimado	

Al fin del ciclo forestal, se considera apeo y replante de igual superficie y especie, con una excepción: la superficie del grupo *E. globulus* del Noreste y del Litoral se replanta con *E. dunnii* al final del primer ciclo.

7. Deliberadamente este informe presenta los picos de oferta de madera, sin utilizar procedimientos aritméticos que los mitiguen (por ejemplo, medias móviles). De esta manera se destaca el carácter de estimación de esta información. Sí se presentan promedios de oferta anual por períodos. Asimismo, si bien para el cálculo se consideran ciclos forestales rígidos, el cultivo forestal es flexible en el momento de definir el turno de corta. La estructura cíclica de los resultados presentados son una estimación de la oferta y no un reflejo de la realidad.

8. Finalmente, esta proyección de la oferta de madera no considera el aumento de producción por ganancias generadas por mejoras genéticas, como tampoco las reducciones de volumen por pérdidas de productividad de los suelos (Scoz 2012).

2.4. Resultados

La tasa anual de plantación de eucaliptos y pinos presentó un aumento constante desde 1990, alcanzando un máximo de 56.058 ha en 1997 para eucalipto y de 32.235 ha en 1999 para pino. En todo el período estudiado, la tasa promedio de plantación fue de 39.833 ha año⁻¹, con 28.710 ha año⁻¹ para el eucalipto y 11.123 ha año⁻¹ para el pino (Figura 2a).

Para 2012 se estima que la oferta anual de madera de eucalipto y pino superará 9,5 millones de m³. Para el período comprendido entre 2010 y 2030 la oferta anual promedio de madera de eucalipto estará por encima de 11,2 millones de m³ y la de pino apenas por debajo de 3 millones de m³. Dada la periodicidad de los ciclos forestales, la oferta de madera no será necesariamente uniforme y por lo tanto se advierten picos de oferta de madera: para eucalipto en el entorno de los años 2017 (17,4 millones de m³) y 2027 (20,6 millones de m³), y para pino alrededor de 2014 (3,9 millones de m³) y 2022 (6,2 millones de m³) (Figura 2b).

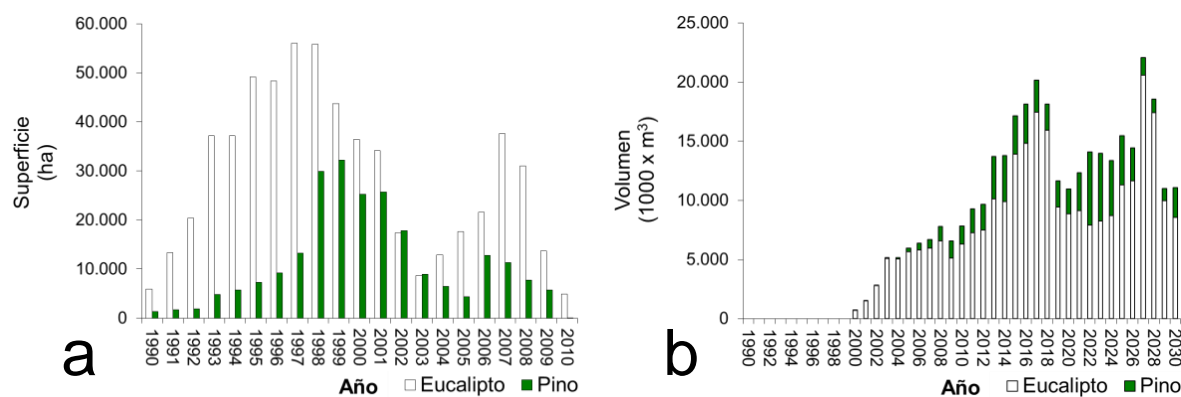


Figura 2. a) Superficie plantada por proyecto en el período 1990-2010 (MGAP 2012); b) proyección de oferta de madera con destino industrial para el período 1990-2030

La oferta de madera destinada a la producción de celulosa presenta para el período 2010-2030 un promedio anual de 10,0 millones de m³, que surge de la plantaciones para celulosa (8,2 millones de m³) y del 60% del volumen del agrupamiento *E. grandis* destinadas a transformación mecánica (1,8 millones de m³). Aquí se refleja fuertemente el supuesto de que toda la madera del agrupamiento *E. grandis* de Tacuarembó, Rivera y Cerro Largo se destina a madera mecanizada (Figura 3a).

Considerando solamente la madera cultivada para celulosa, el aporte promedio anual de los grupos *E. dunnii*, *E. globulus*, *E. grandis* y *E. viminalis* es 3,1; 2,6; 2,5 y 0,1 millones de m³, respectivamente. Se observa el impacto del supuesto de que toda la superficie de *E. globulus* cultivada en las regiones litoral y noreste se transformarán en plantaciones de *E.*

dunnii. También se advierte que si no hay cambios en las tendencias de plantación, *E. viminalis* producirá una oferta marginal (Figura 3a).

Si se considera el escenario actual de dos plantas de producción de celulosa (UPM y Montes del Plata), que consumen cada una aproximadamente 4 millones de m^3 , se observa que toda la madera destinada a la producción de celulosa tendrá ese fin, con escaso margen para la utilización de esa madera con otros destinos, ya sea la transformación mecánica o la producción de energía (Figura 3a).

Asimismo, para el período 2010-2030 la oferta anual de madera para la industria de transformación mecánica presenta un promedio de 4,2 millones de m^3 , de los cuales 3,0 millones de m^3 corresponden a pino y 1,2 millones de m^3 al agrupamiento *E. grandis*. A diferencia de la madera cultivada con destino a celulosa, los ciclos de cultivos forestales orientados a la producción de madera de transformación mecánica son actualmente de al menos 20 años⁴. En el caso del pino, estos ciclos pueden alcanzar los 24 años. Además, el cultivo forestal destinado a la producción de madera de transformación mecánica incluye operaciones con el objetivo de maximizar el volumen de árboles seleccionados, mediante raleos, y de producir madera libre de nudos, mediante podas. Estas operaciones se repiten a lo largo del ciclo forestal y representan inversiones que el productor de madera espera recuperar al final del ciclo (Figura 3b)

Se observa la productividad de *E. grandis*, con un incremento medio anual para la región noreste de $31,1 m^3 ha^{-1} año^{-1}$, frente a la productividad de pino de $13,0$ y $9,2 m^3 ha^{-1} año^{-1}$ para las regiones Noreste y Litoral, respectivamente. Si bien para el pino se considera un diámetro mínimo de utilización de 15 cm frente a 8 cm para *E. grandis*, ya que esta especie se utiliza para la producción de celulosa (Hirigoyen 2012), la diferencia entre ambas especies se debe a la alta capacidad de producción de madera de *E. grandis* en el noreste del país (Figura 3b).

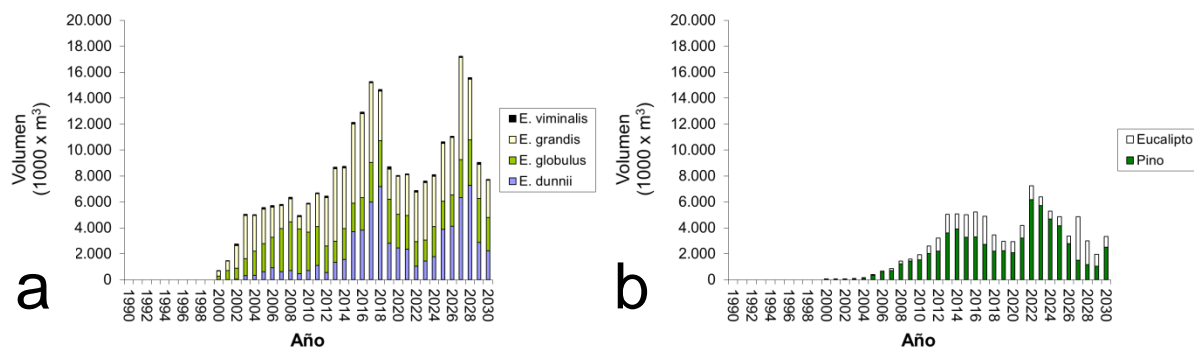


Figura 3. Proyección de la oferta de madera para el período 1990-2030. a) madera con destino a la producción de celulosa por agrupamiento de especies; b) madera con destino a la producción de madera de transformación mecánica por agrupamiento de géneros

Se estima que actualmente la capacidad industrial de transformación mecánica de madera en rollo es 1,4 millones de m^3 , dividido en 720.000 m^3 y 695.000 m^3 de pino y *E. grandis*, respectivamente⁵. La información surge de las empresas de transformación mecánica con consumos superiores a 95.000 m^3 anuales. Además, se estima la capacidad de producción de las empresas menores mediante el volumen de venta anual promedio (2010-2011) de una empresa proveedora de madera en rollo, Global Forest Partners. Tanto Weyerhaeuser S.A. como Urupanel S.A. tienen planificado aumentar significativamente su consumo de

⁴Actualmente existe una tendencia marcada en los productores forestales de reducir los ciclos a menos de 20 años (Morás 2012)

⁵Está en curso un inventario de industrias de la madera de transformación mecánica, encomendado por el Consejo Sectorial Forestal-Madera al proyecto de Producción de Energía a partir de Biomasa (PROBIO), por lo que en 2013 se contará con información más precisa.

madera en rollo. Sin embargo, aun duplicando la capacidad industrial instalada, ésta no sería suficiente para procesar el volumen de madera cultivada de pino con destino a la transformación mecánica que estará disponible en los próximos años (Figura 3b y Tabla 6).

Tabla 6. Capacidad instalada a 2012 de consumo de madera en rollo destinada a la transformación mecánica (Annunziatto 2012, Balerio 2012, Elhordoy 2012, López 2012, Posse 2012, Sarries 2012).

Empresa	Industria	Volumen consumo madera en rollo (m ³ año ⁻¹)	
		Pino	Eucalipto
Weyerhaeuser S.A.	Contrachapados	175.000	325.000
Urufor S.A.	Aserrado	-	300.000
Dank S.A.	Aserrado	150.000	-
Urupanel S.A.	Contrachapados	180.000	-
Forestal Caja Bancaria	Aserrado	55.000	40.000
Cientes de Global Forest Partners	Aserrado	160.000	30.000
Total		720.000	695.000

Asimismo, es necesario considerar que las empresas de transformación mecánica de mayor capacidad de procesamiento (Weyerhaeuser S.A., Urufor S.A., Urupanel S.A., Dank S.A. y Forestal Caja Bancaria) tienen una integración vertical desde el bosque a la industria, y por lo tanto no necesitan abastecimiento externo, a excepción de Urupanel S.A. Por lo tanto, existen productores que actualmente no tienen mercado local para colocar su producto, la madera en rollo.

Basado en esta estimación, descontando las empresas de integración vertical, en los próximos años habrá materia prima disponible para instalar capacidad industrial para procesar 2,3 millones de m³ de pino y 500.000 m³ de eucalipto. En un escenario que considerara el doble de la capacidad industrial estimada, aun sería necesario hacer inversiones para procesar **1,6 millones de m³ de pino;** mientras que la demanda de eucalipto superaría ligeramente la oferta. Por lo tanto, el déficit de capacidad industrial está claramente concentrado en el pino. La oportunidad de instalar esa capacidad industrial depende exclusivamente de factores económicos, tales como disponibilidad de mercados y costos de transformación, ya que la materia prima está disponible y la tecnología de transformación es conocida.

Para el período 2010-2030 habrá una oferta promedio anual de 1,2 millones de m³ anuales de madera del agrupamiento *E. grandis* cultivada con destino a la producción de madera de transformación mecánica, concentrada en los departamentos de Tacuarembó, Rivera y Cerro Largo. La mayor parte del volumen se obtendrá en la tala rasa, ya que los raleos tienen escasa incidencia en la oferta de volumen total. Se estima que del total del volumen extraído (3,0 millones de m³), el 40% alcanzará las dimensiones y la calidad necesaria para aserrado o debobinado. El restante 60% se destinará a celulosa, en un mercado local demandante de este producto. Consecuentemente, la industria de transformación mecánica de *E. grandis* utilizará la madera de la que pueda recuperar el mayor valor, y el resto se destinará a la producción de celulosa (Figura 4a).

En este punto se observa la importancia de contar con una cadena forestal completa, capaz de absorber productos de distintos orígenes. La industria celulósica es un complemento sumamente importante para la industria de transformación mecánica de eucalipto, ya que consume la madera que a esta última le resulta costosa de procesar (madera en rollo de mala forma, con nudos, de bajo diámetro, etc.). Además, también consume subproductos de la transformación, tales como chips. También es necesario considerar que la industria de celulosa representa un competidor por la madera de baja calidad de eucalipto, en la que productos de transformación mecánica con escaso valor agregado difícilmente puedan competir. En un escenario distinto, la industria del pino no está complementada por una demanda que capte el recurso masivamente, como podría ser una planta de celulosa o de

tableros, especialmente del tipo de viruta orientada (OSB). Por lo tanto, los propietarios de los plantaciones deben buscar productos para toda la madera en rollo, sin poder concentrarse exclusivamente en la transformación de los que reportan mayor valor (Tabla 5 y Figura 4a).

Para este mismo período 2010-2030 se estima una oferta anual promedio de 2,9 millones de m³ de madera de pino, de los cuales 1,4 millones de m³ corresponden a madera de raleos. La oferta anual promedio de madera de pino para las regiones Centro-Sur, Litoral y Noreste es 0,2; 0,4; y 2,4 millones de m³, respectivamente. Por lo tanto, la mayor parte de esta oferta se concentrará en los departamentos de Tacuarembó y Rivera (Figura 4b).

Se observa que en la región Litoral y Centro-Sur los dos primeros raleos no producen trozas en la categoría superior. La mayor parte de la producción está concentrada en la categoría B. Es necesario esperar al turno final (24 años) para obtener una proporción interesante de trozas de la categoría C (Tabla 7 y Figura 4b).

En la región Noreste, de mayor crecimiento, en el segundo raleo, previsto a los 15 años, ya se observa un 50% del volumen en la categoría C. A turno final, esta proporción llega al 87%. En el cultivo de pino se observa que la madera de raleos tendrá incidencia en el volumen total, principalmente el segundo raleo. Para el aserrado o el debobinado, los dos procesamientos mecánicos instalados en el país, esta madera no es óptima, debido a sus dimensiones y forma. Esto, sumado a la ausencia de demanda para el pino como insumo para la producción de celulosa, hace que exista una oferta importante de madera sin destino industrial (Tabla 5, Tabla 7 y Figura 4b).

Tabla 7. Pino: proporción de volumen por región, tipo de cosecha y categoría de troza. Modificado a partir de Bussoni y Cabris (2006, 2010).

Región	Cosecha	Año	Categoría de troza			Total
			A	B	C	
Litoral ⁶ y Centro-Sur	1 ^{er} raleo	13	7	93		100
	2 ^{do} raleo	16	29	71		100
	Tala rasa	24	9	39	52	100
Noreste ⁷	1 ^{er} raleo	10	50	50		100
	2 ^{do} raleo	15	6	44	50	100
	Tala rasa	24	1	12	87	100

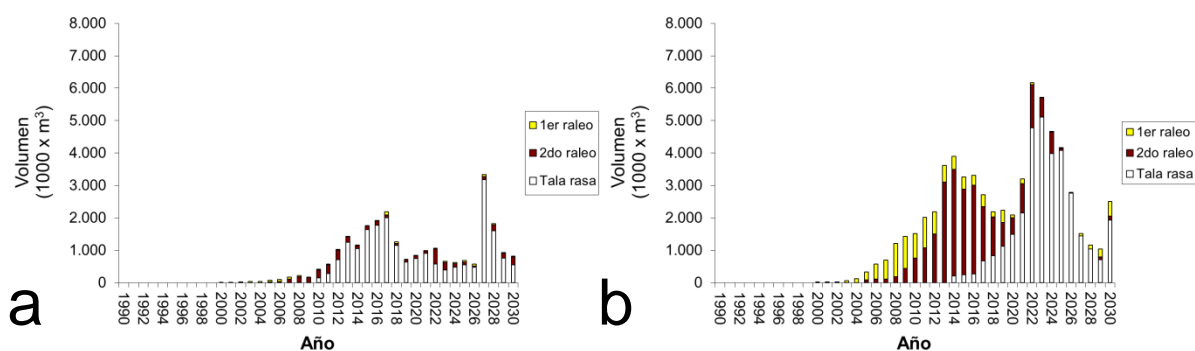


Figura 4. Proyección de la oferta para producción de madera de transformación mecánica por especie y sistema silvicultural para el período 1990-2030. a) agrupamiento *E. grandis*; b) agrupamiento Pino

⁶ Sistema III (Bussoni y Cabris 2006)

⁷ Sistema II (Bussoni y Cabris 2010)

3. Acción 4: Identificación de productos que requieren innovación

3.1. Introducción

En Uruguay la producción forestal del pino y de gran parte de la de *Eucalyptus grandis* está orientada a la transformación mecánica para la fabricación de productos de construcción y carpintería y, dentro de éstos, a la madera de apariencia. Por lo tanto, los ciclos forestales son más largos que en las plantaciones dedicadas a la producción de celulosa, e incluyen inversiones en podas y raleos. De esta manera se obtienen árboles de buenos diámetros y con madera libre de nudos, lo que permite la obtención de escuadrías o chapas libres de defectos, demandadas en los mercados internacionales. La madera libre de defectos es poco abundante en el mundo y, por lo tanto, ese es uno de los rasgos más atractivos de la madera producida localmente (Zarandona 2012).

Las plantaciones destinadas a la producción de celulosa o energía se gestionan para maximizar crecimiento y densidad, mientras que las destinadas a la transformación mecánica tiene como objetivo obtener madera libre de nudos, forma apical, y la minimización de madera de tensión, entre otros atributos. Es técnicamente ineficiente procesar mecánicamente madera destinada a celulosa o energía, ya que los objetivos de la producción forestal son distintos, y por lo tanto el material tiene propiedades que no se ajustan a los requerimientos de la transformación mecánica.

Localmente, la industria de madera de transformación mecánica está casi exclusivamente dedicada a la fabricación de dos grupos de productos: 1) madera aserrada; 2) tableros contrachapados (Tabla 3).

Madera aserrada

El primer grupo consiste en las diversas escuadrías que se obtienen al aserrar madera de pino y eucalipto. Las especies dominantes son *Pinus taeda*, *P. elliottii* y *E. grandis*. Para el mercado interno, el grado de diferenciación del producto es escaso, ya que no hay normativa local de clasificación por calidad. Generalmente la madera se seca a la intemperie y tiene como destino final la utilización en la industria de la construcción local para la fabricación de encofrados, moldes y andamios.

En forma paralela a esta industria incipiente, existe una industria desarrollada, concentrada en un número reducido de empresas, que en 2011 exportó 50 millones de U\$S de madera aserrada. Los productos exportados están diferenciados: es madera aserrada, seca y clasificada de acuerdo a los requerimientos del mercado final.

La clasificación se realiza en función de la cantidad de material libre de defectos que es posible obtener de cada pieza. A mayor proporción de madera libre de defectos, mayor valor. La madera se utiliza para la fabricación de aberturas, partes de muebles, molduras, y componentes de la fabricación de viviendas. Como ejemplo, las ventas de madera de coníferas destinada al mercado norteamericano deben definir la especie, las dimensiones y su tolerancia de desvío a las mismas, la clasificación, el contenido de humedad, el tipo de cepillado, el tronzado a largo final, el maquinado de los cantos, y el sello de la normativa seguida para la clasificación (Leckey 1998).

Tableros contrachapados

El segundo grupo es el formado por los contrachapados, también conocido como tableros terciados, compensados o fenólicos. La fabricación del producto consiste en producir chapas de madera de bajo espesor mediante el debobinado de trozas. Una vez secadas, se colocan

superpuestas de forma perpendicular a la dirección de las fibras de la chapa adyacente. Las chapas de madera se adhieren unas a otras utilizando adhesivos fenólicos.

Los tableros se diferencian por el número de chapas, la calidad de las mismas (presencias de singularidades y defectos propios de maquinado), la posición final de servicio (interior o exterior) y la composición de especies. En Uruguay los tableros contrachapados son producidos por dos compañías localizadas en Tacuarembó, Weyerhaeuser Productos S.A. y Urupanel S.A.

3.2. Recomendación

Este informe recomienda que en Uruguay las plantaciones forestales con destino a la industria de transformación mecánica mantengan como destino la fabricación de productos para la construcción, lo que se fundamenta en los siguientes puntos:

1. La madera es un material renovable, su transformación en productos tiene bajo requerimiento energético, y los bosques que la generan son un sumidero de carbono atmosférico.
2. Existe experiencia local en la fabricación de productos elaborados de madera para la construcción.
3. Es un nicho de mercado con perspectivas de desarrollo regional e internacional auspiciosas.
4. Existe normativa internacional bajo la que sería factible producir y cuya aplicación permitiría ingresar a mercados actualmente no explotados.
5. Es compatible con utilizar parte del material para fabricar productos de madera de apariencia (de mayor valor) y con proveer de subproductos a las industrias de celulosa y energía.
6. El incremento del uso de madera de origen local en construcción implica la posibilidad de sustituir materiales cuya fabricación es intensiva en el uso de energía, tales como metales, hormigón y plástico.

Se identifica la madera aserrada como el producto que requiere innovación. Se recomienda que se incorpore tecnología para fabricar elementos encolados de madera maciza para la industria de la construcción, ya sean de calidad estructural o para carpintería y mueblería. A continuación se enumeran algunas razones:

1. Los elementos ensamblados de madera maciza permiten la utilización de madera de diversas calidades combinadas.
2. Mejora las propiedades mecánicas de la madera simplemente aserrada.
3. Permite la complementación de industrias: el proceso de producción está compartimentado y los subproductos intermedios son almacenables.
4. Existe normativa internacional a la que es posible ajustar la fabricación y el control de calidad, simplificando el comercio local e internacional.

3.2. Objetivos

Objetivo general

Describir la fabricación y usos de elementos encolados de madera maciza (en adelante, EEM) para la construcción como producto de exportación, factible de obtenerse a partir de madera producida localmente.

Objetivos específicos

1. Descripción del proceso de fabricación de los EEM.
2. Distinción entre EEM con calidad estructural y EEM para carpintería y mueble.
3. Descripción de un resumen de la normativa internacional vigente para la fabricación y para el control de vigas de MLE.

3.2. Fabricación de elementos encolados de madera maciza (EEM)

El EEM es un producto formado por la superposición de listones de madera maciza más largos que angostos, unidos mediante adhesivos por la cara o el canto o las testas, y prensados. Los listones se fabrican con secciones de madera encastradas por las testas y las piezas son utilizadas en el sentido de las fibras (paralelo al eje del árbol). El largo y el ancho de este producto están determinados por las instalaciones industriales (fundamentalmente la prensa) y la capacidad de transporte, y no por las dimensiones del árbol. La tecnología del prensado permite curvar las piezas, por lo que se obtienen diversas geometrías, enriqueciendo las posibilidades de diseño.

Este producto se fabrica tradicionalmente a partir de madera de coníferas (pino, abeto, picea), pero también se utilizan especies de frondosas (Wegener *et al.* 2009). El proceso de fabricación de EEM genera productos intermedios que, para el caso de las coníferas en general y del pino en particular, tienen normativa de calidad y se comercializan en el mercado internacional.

El desarrollo comercial de las frondosas es más limitado debido al desconocimiento de las diversas especies disponibles (Frühwald *et al.* 2003) y al incipiente conocimiento técnico del encolado para estas especies. En Uruguay se fabrican EEM de pino (*P. taeda* y *P. elliotii*) y de eucalipto (*E. grandis*) (Dank S.A. 2012, Raíces S.R.L. 2012, Urufor S.A. 2012).

Los párrafos que se presentan a continuación describen procesos que sencillamente se podrían observar de forma más enriquecedora en cualquiera de las fábricas mencionadas.

La fabricación de EEM requiere de los siguientes procesos: 1) aserrado; 2) secado; 3) cepillado; 4) clasificación; 5) optimización; 6) fabricación de listones (encastrado y encolado); 7) cepillado de los listones; 8) encolado y prensado de los listones, ya sea en las caras o en los cantos, para producir madera laminada encolada o paneles, respectivamente; 9) cepillado del elemento y 10) tronzado a largo final.

Para ello, es necesario contar con la siguiente capacidad industrial: aserrado, secado artificial, cepilladora de cuatro caras, sierra de corte longitudinal, fresadora y máquina de encastrar tipo *finger-joint*, y prensa de largo variable (Figura 5).

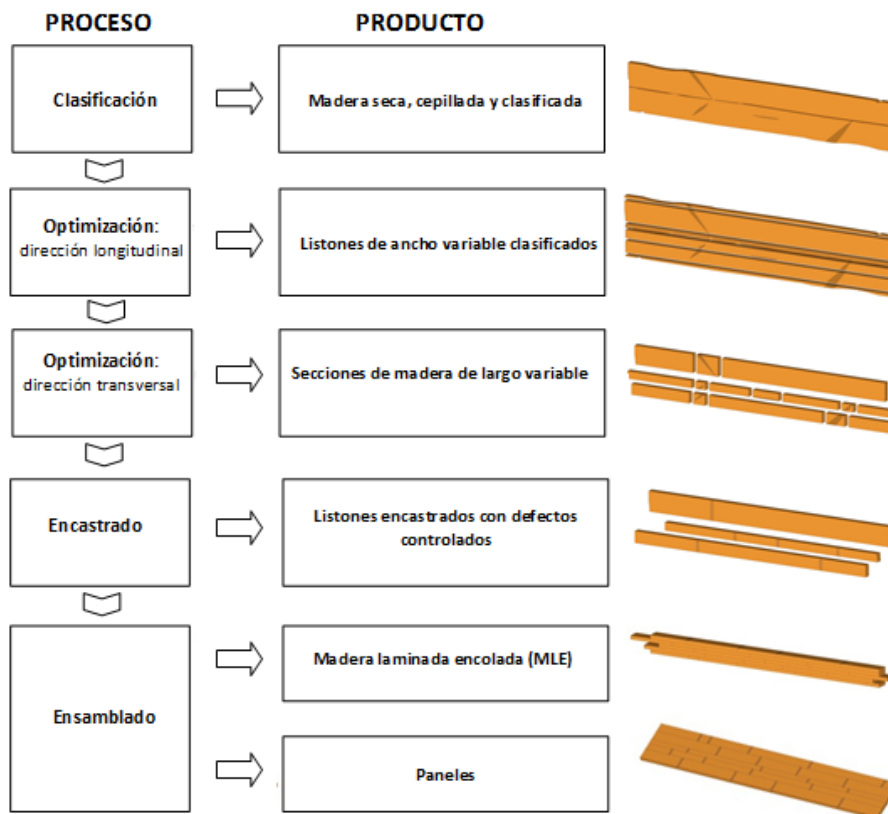


Figura 5. Esquema de producción de EEM: MLE y paneles

En el aserrado se define el espesor y el ancho de los listones. Generalmente, el espesor está en el rango de 25 a 50 mm. El secado se realiza a un contenido de humedad objetivo de $10 \pm 2\%$, lo que garantiza un encolado aceptable. Por lo tanto, para fabricar este producto es imprescindible contar con madera seca artificialmente. El cepillado posterior a dos caras tiene como objetivo resaltar las singularidades de la madera (nudos, médula, bolsas de resina o quino, rajaduras, etc.), para así mejorar la toma de decisiones al momento de optimizar. Las tablas, ya secas y cepilladas, se clasifican de acuerdo a la presencia de singularidades (nudos, médula, rajaduras, etc.). El optimizado consiste en maximizar el volumen de madera libre de defectos. Comprende dos procesos, el rajado y el tronzado. El rajado es un corte en el sentido longitudinal de las fibras (paralelo al eje del árbol) en el que se obtienen listones de ancho variable, buscando maximizar la producción de listones del ancho requerido. A continuación se realiza el tronzado (perpendicular al eje del árbol), en que se eliminan las singularidades y se producen piezas de largo variable, conocidos como *blocks* (y ya en sí mismos un producto de exportación), que se clasifican por espesor y ancho.

Los *blocks* son el insumo para la producción de las láminas (6), cuyo proceso de fabricación consiste en fresar ambas testas de las piezas con uniones dentadas (también conocidas como *finger-joint*) y aplicar adhesivo en el fresado, para finalmente encastrar y prensar los listones en el sentido longitudinal. Cada listón está compuesto de tantos *blocks* como sean necesarios para alcanzar el largo deseado. La fabricación de los listones se realiza en máquinas especialmente diseñadas para ese fin. Los adhesivos empleados son generalmente resinas de poliuretano o fenólicas, y su definición radica en el uso final que tendrá la pieza, ya sea interior o exterior.

Una vez fabricados los listones, y habiendo transcurrido el tiempo necesario para que el adhesivo fragüe, se cepillan las cuatro caras para eliminar las imperfecciones del encastre. Los listones se clasifican por espesor, ancho, largo y presencia de singularidades. Hasta

este punto, la fabricación de vigas de madera laminada encolada (MLE) y de paneles es idéntica.

Madera laminada encolada (MLE)

La fabricación de vigas de MLE supone el encolado de los listones, en este caso denominados láminas, por la cara. Es posible fabricar una lámina de ancho variable, compuesta de múltiples láminas encoladas por el canto, y de esta forma alcanzar cualquier ancho requerido. Sin embargo, normalmente la MLE se fabrica con una única lámina por capa, estando la cantidad de láminas definida por la altura de la sección requerida.

En el proceso de ensamblado, las láminas encoladas se someten a una presión vertical constante (aproximadamente 7 bar) durante un tiempo que está determinado por el tipo de adhesivo y la especie. Una vez que la cola fragua, se realiza un cepillado de las cuatro caras y un tronzado a largo final.

Es habitual que la MLE se procesa en una moldurera para obtener perfiles laminados, por ejemplo para cantos de ventanas, marcos, escalones, etc. Una vez terminado el producto, es necesario protegerlo de los agentes ambientales hasta su colocación en el uso final, por lo que es práctica común que las piezas se comercialicen envueltas en material protector, como por ejemplo film de plástico (Forest Products Laboratory 2010, Wagenführ, Scholz 2008).

Paneles

Los paneles se fabrican encolando los listones por el canto, aunque también por la cara y el canto, aplicando presión en prensas especializadas en forma perpendicular al eje de los listones. Es práctica común realizar molduras de encastre en el canto para mejorar las propiedades mecánicas del panel. Generalmente el adhesivo se aplica a temperatura ambiente y, para aumentar la rapidez de fraguado, se emplean prensas con calor o de radio frecuencia. Una vez que adhesivo fragua y el panel está rígido, se cepillan las caras inferior y superior, para finalmente dimensionar el panel según el largo y el ancho final.

Un tipo particular de paneles que en la actualidad tiene gran variedad de aplicaciones son los paneles contralaminados. Estos consisten en múltiples capas formadas cada una de ellas por listones de madera maciza encolados por el canto. Cada capa se une perpendicularmente a la dirección de la fibra de la adyacente mediante el empleo de adhesivos y es común que se fabriquen en tres capas. Tienen aptitud estructural, y su disposición de capas adyacentes y perpendiculares entre sí lo convierte en un material donde la dirección del esfuerzo no tiene efecto en la resistencia. Los paneles contralaminados presentan baja conductividad térmica y acústica y se utilizan en la construcción de edificios.

Adhesivos

El adhesivo a emplear en la fabricación de EEM depende de la temperatura y de la humedad ambiente a la que estará sometida la pieza. Por lo tanto, debe estar absolutamente definido si el producto se utilizará en el interior o expuesto al ambiente. Los adhesivos se aplican mediante presión y en algunos casos con aplicación de calor o de radiofrecuencia.

En EEM con destino estructural, el uso de adhesivos es más restrictivo, especialmente cuando están expuestos a la intemperie. Durante su fabricación el producto será sometido a ensayos para comprobar la calidad de la unión. Dentro de los adhesivos empleados se encuentran las resinas fenólicas, de urea-formaldehído, de urea-formaldehído-melamina, y de resorcinol-formaldehído, y también poliuranatos e isocianatos. Estos últimos son

adhesivos sumamente reactivos, utilizados en especies que presentan dificultades para el encolado. Los adhesivos más comúnmente utilizados para la fabricación de MLE estructural son las resinas fenólicas y los poliuronatos (Wagenführ, Scholz 2008).

3.3. EEM con calidad estructural y EEM para carpintería y mueble

En Uruguay se produce madera aserrada para la construcción local, pero el uso estructural de la madera es virtualmente desconocido por constructores, arquitectos e ingenieros. Basta observar la escasez de edificios y construcciones de madera en el país. Como confirmación adicional está el consumo de madera por habitante, más bajo que el promedio de Sudamérica y el Caribe, donde el consumo tampoco es alto en la comparación global (Tabla 2). Por lo tanto, los fabricantes de madera no tienen demanda por un producto de calidad estructural certificable. Esto ocurre tanto para pino como para *E. grandis*.

Un mercado de exportación de madera de pino estructural de origen local estaría limitado a la categoría de menor valor, ya que las propiedades mecánicas son inferiores a las de maderas similares del hemisferio norte (CEN 2010, O'Neill *et al.* 2003). Esto es un inconveniente del rápido crecimiento de los pinos (*P. taeda* y *P. elliottii*) en esta región: se genera volumen en poco tiempo y los ciclos forestales son cortos, pero todo el árbol tiene características de madera juvenil. Sin embargo, la poda, práctica establecida en Uruguay para maximizar el volumen libre de nudos, también mejora las propiedades mecánicas de la madera de pino, aumentando su resistencia.

El empleo de una clasificación estructural de la madera en función de las singularidades (presencia de nudos, médula, defectos de secado, etc.), permitiría seleccionar las mejores tablas para fines estructurales (O'Neill *et al.* 2003). De esta manera, una proporción importante de la madera producida podría alcanzar grados estructurales. Sin embargo, se trataría de piezas escogidas que seguramente competirían con el destino de madera de apariencia, que tiene mayor valor en los mercados internacionales que la comercializada para la construcción (Balerio 2012).

En Uruguay se cultiva *E. grandis* para la fabricación de productos de construcción y de carpintería sin fines estructurales. A nivel mundial la madera aserrada es fundamentalmente de coníferas: en 2010 la producción de escuadrías de especies tales como pinos, abetos, piceas y psedotsugas representó más del 70% de la producción (FAO 2012). Asimismo, la fabricación de vigas de MLE está también concentrada en coníferas (Frühwald *et al.* 2003). A esto se le agrega que la madera de *E. grandis* es una especie relativamente desconocida en el mercado internacional de madera (Sánchez *et al.* 2008), por lo que es necesario buscar alternativas tecnológicas para aumentar la demanda.

Por lo tanto, el desarrollo de la industria de transformación mecánica destinada a la madera para construcción de grado estructural para exportación, debe superar dos obstáculos: 1) las especies de pino cultivadas en el territorio tienen bajas propiedades estructurales; 2) la utilización de madera de *E. grandis* en el mundo es marginal. Se propone la producción de vigas de MLE como alternativa para el desarrollo de una fabricación local destinada a productos de madera de calidad estructural.

Considerando el primer punto, para una idéntica resistencia de rotura a flexión, las vigas de MLE tienen valores de resistencia, rigidez y densidad mayor que la madera aserrada, excepto para el cortante. En el cálculo estructural, esto se traduce en que para una viga de madera de igual longitud y sometida a una carga idéntica, la madera laminada requeriría de una sección ligeramente menor que la madera aserrada para cumplir con todos los requisitos de aptitud estructural (CEN 2004). Esto permitiría mejorar la baja aptitud estructural de la madera local, especialmente la del pino.

Los resultados de un estudio realizado en vigas de MLE producido a partir de árboles de bajo diámetro de pino⁸ (*P. taeda*) y *E. grandis* indican que el primero tiene una categoría estructural muy baja, mientras que el segundo alcanza valores estructurales aceptables (O'Neill, Quagliotti 2009). Por lo tanto, en principio la fabricación de EEM de pino debería estar orientada a la producción de madera para carpintería y mueble. Sin embargo, si se fabricaran vigas de MLE de pino (un producto sumamente conocido internacionalmente) con madera aserrada seleccionada, es probable que el producto alcanzara calidad estructural. Se requiere investigación local en este aspecto.

Analizando el segundo punto, para las vigas de MLE de *E. grandis*, el problema no es la calidad estructural, ya que de acuerdo a estudios realizados por el LATU la alcanza (O'Neill, Quagliotti 2009), sino el escepticismo internacional para el uso de especies relativamente desconocidas. En Uruguay se fabrica MLE de *E. grandis*, aunque sin certificación estructural. La fabricación de MLE de calidad estructural de acuerdo a la normativa del lugar de destino favorecería su exportación frente a la madera aserrada. Existe experiencia internacional en la incorporación de especies de frondosas de uso poco habitual en el mercado de MLE estructural, como por ejemplo haya y castaño (Frühwald *et al.* 2003, Sierolam 2012).

Asimismo, la MLE estructural permite cubrir luces más grandes que la madera aserrada al no estar limitada su longitud por la altura del árbol (Forest Products Laboratory 2010). Este aspecto debe tenerse en cuenta para la exportación, ya que el largo máximo de un contenedor es de 12 m. Esto limitaría uno de los aspectos más atractivos de MLE estructural, ya que los largos más comunes de este producto se encuentran entre 12 y 18 m (Balerio 2012). Existen piezas estructurales más cortas y también otras formas de exportar, pero el máximo largo es un aspecto fundamental de este producto.

Una limitante importante que tiene Uruguay para la exportación de productos de madera sofisticados es la distancia a los mercados de destino. La MLE se consume masivamente en regiones alejadas de Uruguay, como EEUU, Canadá, y Europa. En estos lugares el cliente está acostumbrado a un servicio directo del proveedor y es común realizar ajustes de último momento en los pedidos (Zarandona 2012). Por lo tanto, estos productos de EEM, tanto estructurales como para carpintería y mueble, no se comercializan como *commodities*, sino como productos específicos para cada cliente. Los fabricantes locales interesados en el desarrollo de un canal exportador de estos productos deben considerar seriamente este punto.

3.4. Normativa para vigas de MLE de calidad estructural

La fabricación de vigas de MLE para uso estructural requiere controles de calidad para cada partida de producción. Fundamentalmente se comprueba la calidad de las uniones, tanto en las uniones longitudinales de cada lámina como entre las caras de las láminas⁹. La calidad estructural de la MLE se clasifica en un sistema normalizado de clases resistentes que asigna propiedades de resistencia, rigidez y densidad para la combinación de especies de madera, procedencias y normas de clasificación según el país de origen (CEN 1999). Asimismo, se definen dos productos de MLE en función de la calidad estructural de cada lámina: MLE homogénea y MLE combinada (Fernández-Golfín *et al.* 2003). Aunque la enorme mayoría de la producción mundial de MLE se fabrica con coníferas, la normativa también es válida para frondosas, siempre que la calidad de encolado sea aceptable.

A nivel internacional está normalizada la fabricación, el control de calidad en la fabricación y la determinación de la calidad estructural de la MLE. Ajustarse a una normativa establecida

⁸ Madera con alta proporción de madera juvenil y, por lo tanto, con bajas propiedades mecánicas.

⁹ La separación de las láminas por fallo del adhesivo se conoce como delaminación.

cumple una doble función: 1) a nivel interno, establece un procedimiento comprobado de fabricación, control de calidad y definición de calidad estructural; 2) a nivel externo, el fabricante se ajusta a la norma del país de origen del comprador, lo que simplifica el comercio y permite el acceso a los mercados internacionales (Tabla 8).

Tabla 8. Ejemplos de normativa para la fabricación y ensayo de MLE

Región	Código	Institución	Año	Nombre
Europa	EN 386	Comité Europeo de Normalización	2002	Madera laminada encolada. Especificaciones y requisitos de fabricación
Europa	EN 1194	Comité Europeo de Normalización	1999	Estructuras de madera. Madera laminada encolada. Clases resistentes y determinación de valores característicos
Europa	EN 391	Comité Europeo de Normalización	2002	Madera laminada encolada. Ensayo de determinación de las líneas de encolado
Europa	EN 392	Comité Europeo de Normalización	1995	Madera laminada encolada. Ensayo de esfuerzo cortante en líneas de adhesivo
EEUU	AITC 117	American Institute of Timber Construction	2004	Standard Specification for Structural Glue-Laminated Timber of Softwood Species
EEUU	AITC 119	American Institute of Timber Construction	1996	Standard Specification for Structural Glue-Laminated Timber of Hardwood Species
EEUU	AITC 190.1	American Institute of Timber Construction	2007	Standard for wood products: structural glued laminated timber.

Uruguay debería utilizar la normativa del país de destino de los productos de MLE, ya que de nada sirve invertir en establecer una normativa que no reporta competitividad comercial. Existen numerosos ejemplos de normativa internacional sobre MLE estructural, entre las que se destacan la americana y la europea. Ambas son ampliamente conocidas. El uso de normas de fabricación y control no mejorará los precios de venta, pero sí permitiría el acceso a nuevos mercados. Asimismo, utilizar el mismo sistema normativo para el mercado local que para el de exportación permitirá mejorar la calidad de la MLE estructural utilizada en el país.

4. Acción 5: Introducción de nuevas tecnologías de procesamiento de la madera

4.1. Introducción

La madera tiene dos grandes limitantes para su utilización como material para la construcción o la carpintería: 1) tiene baja estabilidad dimensional; 2) es susceptible al deterioro por agentes bióticos.

El primer punto está determinado por la composición química de la madera: uno de los elementos constituyentes de la madera es la celulosa, una cadena de moléculas de glucosa. La celulosa es higroscópica y su volumen es variable en función del contenido de humedad. Este fenómeno se transmite a todo el material. La estabilidad dimensional de la madera está determinada por el contenido de humedad y por la especie, lo que determina la densidad, la estructura anatómica, el contenido de extractivos, y la tasa de crecimiento.

El segundo punto se refiere a que la madera es biodegradable, lo que, desde el punto de vista ambiental, es un atributo claramente favorable. La disposición final de productos de madera es relativamente inocua, lo que representa una diferencia importante con otros materiales, tales como el plástico o los metales. Esta biodegradación es posible porque los árboles evolucionaron en conjunto con hongos e insectos que se alimentan de la madera. Los árboles vivos se protegen de esta degradación con diversas estrategias. En la madera, tejido vegetal muerto, la más importante es la presencia y concentración de extractivos, compuestos químicos con propiedades fungicidas o insecticidas. Otros factores que afectan a la durabilidad de la madera son el contenido de humedad, la composición química, y el tipo de organismos. La durabilidad natural de la madera, tanto frente a hongos como a insectos, se mide con precisión en ensayos normalizados (Ibáñez *et al.* 2009).

Las especies de madera cultivadas en Uruguay con destino a la producción de madera de transformación mecánica son *Pinus taeda*, *P. elliottii*, y *Eucalyptus grandis*. Estas especies son de media a baja durabilidad natural, tanto frente al ataque de insectos como al ataque de hongos. En Uruguay no se cultivan especies de mayor durabilidad natural. Asimismo, resulta más económico aumentar la durabilidad de maderas abundantes que utilizar madera naturalmente durable, ya que estas son escasas y generalmente son de origen tropical (en regiones sensibles dónde la extracción representa altos costos ambientales, sociales y políticos), y tienen ciclos de producción forestal más largos. Por lo tanto, el desarrollo de productos de madera de procedencia local necesariamente tiene que contemplar dos estrategias: 1) definir productos diseñados para usos en los que la durabilidad no sea una limitante; 2) mejorar la durabilidad de los productos mediante la incorporación de tecnología.

Para la protección de la madera es indispensable considerar el uso final del producto y su vida útil. El tratamiento que se realice debe ajustarse a ambos aspectos. Para usos interiores o poco expuestos al ambiente, la durabilidad natural de la madera producida localmente puede ser empleada con un mínimo de protección. Sin embargo, para todo otro uso la madera debe ser protegida, ya sea por diseño o químicamente.

4.2. Recomendación

Este informe identifica la baja durabilidad de la madera producida localmente, tanto de pino como de *E. grandis*, como una limitante para el desarrollo de un mercado de exportación y, por lo tanto, se concentrará en describir tecnologías para aumentar la durabilidad. Las mismas deben tener el objetivo de aumentar la durabilidad de la madera sin representar un riesgo ambiental.

4.3. Objetivos

Objetivo general

Proponer tecnologías para aumentar la durabilidad de la madera producida localmente.

Objetivos específicos

1. Describir la durabilidad natural de la madera de pino y *E. grandis* cultivada en Uruguay
2. Describir tecnologías para aumentar la durabilidad de la madera
3. Introducción a la modificación térmica y química de la madera

4.4. Durabilidad natural de especies de uso industrial local

La durabilidad natural de la madera está determinada por el contenido de extractivos fungicidas e insecticidas. En la madera se distinguen dos secciones de distinta durabilidad natural: la albura y el duramen. La proporción de albura, duramen y madera juvenil varía en función de las especies. En algunas, la transición entre secciones es clara, mientras que en otros no se distingue fácilmente. La madera de los pinos cultivados en Uruguay (*P. taeda* y *P. elliotii*) no presenta diferencias entre albura y duramen debido a la corta duración de los ciclos forestales. En el caso de *E. grandis* la diferenciación entre albura y duramen es clara.

La albura es la porción exterior del árbol, directamente por debajo de la corteza. Tiene formación más reciente y es más clara que el duramen. Contiene productos de la fotosíntesis, además de un alto contenido de humedad, y consecuentemente es atacada por hongos e insectos. El duramen es la madera interior, más antigua que la albura. Generalmente es más oscura, aunque no todas las especies desarrollan la diferenciación de color. Tiene contenido de humedad más bajo que la albura, no contiene azúcares y tiene alta concentración de extractivos; por lo tanto es más durable que la albura. Asimismo, se puede distinguir otra sección, incluida dentro del duramen, próxima al eje del árbol, que es la primera madera generada, conocida como madera juvenil. La madera juvenil es generalmente menos durable que el duramen que la rodea. (Figura 6) (Wagenführ, Scholz 2008).

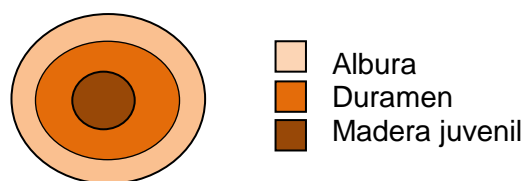


Figura 6. Esquema de las secciones del árbol

De acuerdo a la clasificación de la norma EN 350-2 “Durabilidad de la madera y de productos de la madera”, se definen cinco clases de durabilidad frente al ataque de agentes causantes de deterioro: hongos destructores de la madera, coleópteros xilófagos de maderas secas, termitas, y xilófagos marinos.

La durabilidad frente al ataque de hongos se divide en cinco categorías: la primera (1) corresponde a especies durables, tales como el palo amarillo (*Euxylophora paraensis*), y la última (5) es la ausencia de durabilidad natural, como la haya (*Fagus sylvatica*) o el álamo (*Populus sp.*). Para la durabilidad frente a coleópteros, las especies se clasifican en durables y susceptibles, mientras que para termitas y xilófagos marinos se clasifican en durables, medianamente durables y sensibles (CEN 1995).

La madera de los pinos amarillos de sur (*Southern Yellow Pines*), entre los que se encuentran el *P. taeda* y *P. elliotii*, no es naturalmente durable (CEN 1995). Dado que en Uruguay esta especie no forman duramen, no existen diferencias de durabilidad entre las secciones del árbol, tal como se menciona en la normativa.

A su vez, la madera de *E. grandis*, conocida en Australia, su lugar de origen, como Rose Gum, no es durable de acuerdo a la clasificación australiana (Boas 1947). En ensayos de durabilidad regionales esta información se confirma, tanto frente a hongos destructores de madera (Böthig *et al.* 2008, Lorenzo *et al.* 2009) como en contacto directo con el suelo (Cuffré *et al.* 2010). En *E. grandis* existen diferencias entre albura, duramen y madera juvenil: la albura y la madera juvenil no son durables y el duramen es moderadamente durable. Asimismo, la madera de duramen y la juvenil son resistentes al ataque de insectos coleópteros, mientras que la madera de albura es susceptible al mismo (Lorenzo *et al.* 2009). Tanto la madera de albura como la de duramen son susceptibles al ataque de termitas (Böthig *et al.* 2008).

Un concepto clave para entender la durabilidad de la madera y el tratamiento de protección requerido es el de las clases de uso. Se trata de categorías definidas para distintas condiciones de humedad y de exposición a la intemperie en función del riesgo de ataque por agentes bióticos que pueden deteriorar la madera. En función de las clases de uso, de la durabilidad natural de la madera y del ciclo de vida del producto, se define la necesidad del tratamiento protector (Tabla 6) (CEN 2012).

Tabla 9. Clases de uso (CEN 2012)

Clase de uso	Tipo de uso	Hongos decolorantes	Hongos destructores	Coleópteros	Termitas	Invertebrados marinos
1	Interior seco					
2	Interior expuesto					
3	Exterior sin contacto directo con el suelo					
4	En contacto directo con el suelo y/o agua dulce					
5	Sumergida en agua de mar					

Por lo tanto, en cualquier clase de uso superior a la 1, tanto la madera de pino como la de *E. grandis* debe ser protegida para disminuir el riesgo de deterioro por agentes biológicos. La madera de *E. grandis* tiene mayor durabilidad natural que la de pino, pero aun así es necesario protegerla, porque su durabilidad natural no es suficiente para estar permanentemente expuesta al ambiente.

Este informe considerará las siguientes técnicas para mejorar la durabilidad natural de madera: secado, protección por diseño, impregnación y modificación.

4.5. Secado

El secado de la madera es el primer tratamiento para evitar el deterioro por agentes biológicos. En la industria de la madera el contenido de humedad de la madera se mide en base seca (Ecuación 1)

$$Ch = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \times 100 \quad \text{Ec. 1}$$

dónde Ch es el contenido de humedad; m_1 es la masa de la madera sin secar; m_2 es masa de madera seca

El secado de la madera comienza con el apeo del árbol, cuando el contenido de humedad de la madera es 100% o superior. La susceptibilidad al ataque de hongos, tanto decolorantes como destructivos, así como también de insectos, es máxima cuando la madera contiene agua no vinculada a la pared celular, conocida como agua libre. Una vez eliminada el agua libre, lo que ocurre, dependiendo de las especies, entre 20 y 30%, la madera aumenta sensiblemente su durabilidad natural, y desaparece el riesgo de ataque de hongos. Algunos insectos, especialmente las termitas, pueden atacar la madera a contenidos de humedad bajos (menos de 10%). Para evitar este tipo de deterioro, es necesario aumentar la durabilidad de la madera mediante algún tipo de protección, ya sea ésta por diseño o mediante tratamientos químicos o físicos.

Una vez aserrada, la madera se seca a la intemperie o artificialmente. El secado de madera expuesta a las condiciones ambientales tendrá como contenido de humedad final aquel que esté en equilibrio con la humedad relativa y de temperatura. Para el caso de Uruguay, esta humedad de equilibrio higroscópico se alcanza a un contenido de humedad de aproximadamente 15%¹⁰. La duración del secado a la intemperie depende de las condiciones climáticas: a mayor temperatura y menor humedad relativa ambiental, más rápido es el secado.

A su vez, el secado artificial consiste en someter a la madera a un proceso controlado hasta alcanzar el contenido de humedad objetivo, que puede ser tan bajo como la ausencia total de agua. Existen diversas tecnologías disponibles para secar la madera: secado por convección, en vacío, en vapor sobrecalentado, por radiofrecuencia, etc.

El secado por convección, la tecnología más difundida la madera se apila en cámaras en las que se controla la temperatura, la humedad relativa, y la velocidad del aire. El proceso se programa por etapas para minimizar el tiempo de secado y evitar el daño de la madera que resulta de las tensiones que ocurren durante el secado. El secado es el proceso que más energía consume en la transformación industrial de madera. La fabricación de madera seca requiere aproximadamente el doble de energía que la madera simplemente aserrada; en una planta industrial simple puede significar el 90% de la energía de transformación (Wagenführ, Scholz 2008, Forest Products Laboratory 2010). A pesar del alto requerimiento energético, el secado artificial de la madera es crítico para la producción de productos de madera competitivos, ya que con la aplicación de esa tecnología se obtienen los siguientes resultados:

- se alcanza un contenido de humedad objetivo, aún por debajo del contenido de humedad de equilibrio ambiental
- impide el ataque de agentes bióticos sin necesidad de tratamientos con soluciones protectoras
- permite planificar la producción independientemente de las condiciones ambientales
- disminuye los costos financieros de madera estibada

4.6. Protección por diseño

Actualmente, la protección de madera se entiende como un conjunto de medidas para aumentar la durabilidad de la misma, y no simplemente la aplicación de biocidas (Wagenführ, Scholz 2008). La protección por diseño es una metodología que permite utilizar madera sin tratamiento (o con el menor tratamiento posible) considerando la ubicación de los elementos de madera en la construcción. Se entiende que el producto debe ser diseñado

¹⁰ El LATU trabaja actualmente en un proyecto de investigación para determinar el contenido de humedad de equilibrio de la madera en diferentes regiones del país.

definiendo vida útil, uso en servicio y durabilidad requerida. La protección por diseño es efectiva frente al deterioro provocado por agentes abióticos (lluvia, condensación, radiación UV, etc.) y por hongos. Es menos efectiva contra el ataque de insectos que son capaces de destruir madera a bajos contenidos de humedad, como las termitas y los líctidos. Por lo tanto, en usos que lo requieren es necesario utilizar medidas de protección más completas, como los tratamientos de impregnación en profundidad y la modificación de la madera.

Se enumeran prácticas habituales de protección por diseño: elección de la especie, logística de transporte de componentes, cubrimiento de testas, diseño de aleros de protección de lluvia en edificación, consideración de las pendientes en los distintos componentes para evitar la acumulación de agua, ventilación adecuada, aislamiento del suelo, etc. Este conjunto de medidas deben de ser consideradas desde la concepción del proyecto por los diseñadores, arquitectos e ingenieros y puestas en práctica por los constructores, carpinteros, etc., por lo que implica una transferencia de la preocupación por la durabilidad de la madera desde el fabricante de los componentes al usuario final. Para que la protección por diseño sea exitosa debe ser llevado a cabo por agentes que conozcan el material y sus posibilidades.

La protección por diseño, junto con la elección de la especie adecuada para el uso adecuado, puede ser suficiente para cumplir los requerimientos demandados por un comprador. A nivel comercial, la ausencia de tratamientos químicos es un plus en un mercado cada vez más sensible a la carga ambiental de los productos.

4.7. Impregnación en profundidad

El tratamiento de protección más comúnmente utilizado consiste en sumergir la madera en una solución protectora y aplicar diferencias de presión para facilitar la penetración de la solución en la madera. Existen diversas soluciones protectoras y su uso está ampliamente descrito en la literatura especializada. Actualmente la tendencia internacional y nacional es disminuir la toxicidad de las soluciones protectoras empleadas.

Debido a las características anatómicas de la madera, no todas las especies son impregnables. El grado de impregnabilidad se mide con precisión y las especies se clasifican en función del mismo (CEN 1995). El duramen es más difícil de impregnar que la albura. La madera de pino cultivada en Uruguay es fácilmente impregnable. Por el contrario, el duramen de algunas especies del género *Eucalyptus*, entre las que se encuentra *E. grandis*, no es impregnable a las presiones utilizadas en una planta de impregnación convencional (presión máxima de aproximadamente 15 bar). Dado que las escuadrías de *E. grandis* están, en su enorme mayoría, compuestas de duramen, su impregnación por métodos tradicionales no aporta protección en profundidad a la madera.

La utilización de soluciones protectoras presenta un compromiso entre expandir los usos de un material renovable y abundante y provocar el menor daño ambiental posible. La utilización de biocidas de amplio espectro, tales como soluciones acuosas de sales de cobre-cromo-arsénico (CCA) o la creosota, fue exitosa desde el punto de vista de la preservación de la madera. Sin embargo, su uso presenta serios problemas ambientales que deben controlarse. Entre otros se destacan el riesgo de lixiviado (Lebow *et al.* 2008) y la concentración de sustancias tóxicas en los vertederos (Hill 2006).

En los últimos años el uso de biocidas tradicionales, tales como la creosota, el pentaclorofenato de sodio y el soluciones de CCA generaron resistencia en la opinión pública por el riesgo ambiental que conllevan (Coggings 2008, Ibáñez *et al.* 2009). Además de que la aplicación industrial de esta tecnología implica concentrar estas sustancias en el ambiente, existen otros riesgos asociados. La madera tratada con biocidas de amplio espectro puede ser relativamente inocua para el ambiente mientras se encuentra en servicio, pero al final de la vida útil del producto se transforma en un residuo sumamente

complejo. La disposición final y el reciclaje de madera tratada de esta manera presentan serios inconvenientes para la biósfera. La madera tratada se degrada muy lentamente, aún en forma de partículas y enterrada en vertederos. Su incineración genera sustancias altamente tóxicas. Probablemente la mayor preocupación sea la volatilidad de los compuestos de arsénico, ya que, como problema adicional, no existen mecanismos naturales para inmovilizarlo en el ambiente (Hill 2006, Wagenführ, Scholz 2008).

Los productos de madera tienen una vida útil variable: la del papel de diario se estima en dos meses y la de madera de uso estructural en 75 años (Beyer *et al.* 2011). Por lo tanto, en un ejercicio de análisis que considere productos con un ciclo de vida de un año y una tasa de reciclaje de 90%, al menos una fracción del producto permanecerá en el ambiente 50 años. Si se trata de un producto con un ciclo de vida de 50 años (la madera tratada con CCA garantiza una durabilidad de 30 años), también con una tasa de reciclaje de 90%, más del 50% del producto permanecerá en el ambiente pasados 250 años. La madera tratada con CCA difícilmente tenga una tasa de reciclaje de 90%, por lo que la magnitud del problema se agrava (Figura 7) (Hill 2006).

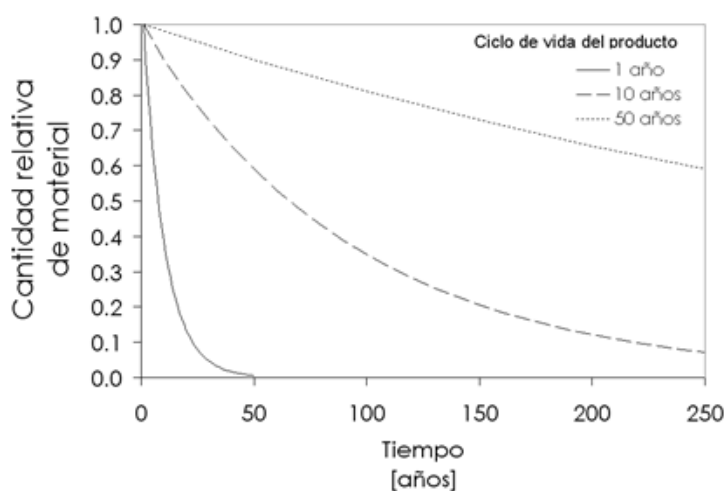


Figura 7. Pérdida de material en el ambiente, considerando una tasa de reciclaje de 90% y ciclos de vida del producto de 1, 10 y 50 años (Hill 2006).

Consecuentemente, en Europa, EEUU, Japón, Australia y Canadá, entre otras regiones, se desarrolló legislación para regular y controlar el uso de biocidas en el tratamiento de madera. Esta normativa sigue una tendencia clara, que es restringir el tratamiento de madera con este tipo de sustancias solamente para las clases de uso más exigentes (Tabla 7: clases 4 y 5) y sin contacto directo con el hombre o animales (Coggings 2008, Consejo Europeo 2006, Ibáñez *et al.* 2009, Schreiber *et al.* 2007a, US Environmental Protecting Agency 2012).

Considerando datos de 2008, en Uruguay existen 19 plantas impregnadoras de madera que producen 100.000 m³ de madera tratada anualmente. La mayoría utilizan CCA como solución protectora. A diferencia de lo que ocurre en otros países, su uso no está específicamente regulado. Tampoco existe una gestión de la madera tratada, ya sea en servicio o una vez terminada la vida útil del producto. En los últimos años se realizaron esfuerzos para mejorar el uso de la tecnología en ese campo (Böthig 2008, 2012, Schreiber *et al.* 2007a, b).

Por lo tanto, existe la necesidad de aumentar la durabilidad de la madera producida localmente con el mínimo impacto ambiental posible. Para ello se desarrollaron nuevas tecnologías de tratamiento de madera que, entre otras ventajas, permiten su disposición final al finalizar el ciclo de vida del producto, tal como si éste estuviera fabricado con madera sin tratar.

4.8. Modificación

La madera modificada busca superar en un único proceso las dos grandes limitantes de la madera como material de construcción: 1) la baja durabilidad natural; 2) la baja estabilidad dimensional. Asimismo, tanto el producto de madera modificada como su disposición final no presentan mayores problemas ambientales que la madera sin tratar. Como ventajas adicionales, la modificación de la madera permite diseñar un proceso que alcance mejoras en otros aspectos técnicos, tales como la dureza superficial o la resistencia a la radiación UV (Wagenführ, Scholz 2008).

Dado que la madera modificada no es tóxica, puede utilizarse en contacto directo con alimentos, personas o animales, servicios en los que la madera tratada convencionalmente está seriamente limitada. Esto hace que algunos usos, tales como baños, piscinas, saunas, y juegos infantiles sean frecuentes.

La modificación de la madera se realiza utilizando especies abundantes y disponibles, preferentemente maderas de climas templados que tengan propiedades conocidas. De esta manera, se obtiene un producto uniforme, lo que favorece la comercialización. Actualmente en Europa se observa que la madera modificada, concretamente la madera termotratada de coníferas, presenta una fuerte competencia frente a la madera tropical (UNECE/FAO 2011), tradicionalmente empleada en usos que requieren alta durabilidad.

Madera termotratada

El tratamiento térmico consiste en aplicar calor a la madera en una atmósfera con baja concentración de oxígeno. Se utilizan temperaturas en el rango entre 160 y 260 °C en atmósferas saturadas de vapor de agua o nitrógeno, mientras que otros procesos aplican calor a la madera sumergida en un baño de aceite. El calor provoca la degradación de la hemicelulosa que, junto con la celulosa y la lignina, es uno de los componentes básicos de la constitución química de la madera.

Esta modificación hace que la madera se vuelva menos higroscópica, y por lo tanto, que tenga mayor estabilidad dimensional. Al mismo tiempo, se vuelve menos atractiva para el ataque de hongos e insectos. La degradación de la hemicelulosa provoca una pérdida de masa, por lo que la densidad disminuye, la madera se oscurece y generalmente presenta un ligero olor a azúcar quemado.

Como desventaja, la degradación de la hemicelulosa hace que las propiedades mecánicas del material disminuyan, comprometiendo el uso estructural de la madera. Sin embargo, los usos más comunes de la madera termotratada no requieren aptitud estructural, ya que se emplea en obras tales como fachadas, revestimientos, suelos, y tarimas (Hill 2006, Wagenführ, Scholz 2008).

El tratamiento térmico tiene como ventaja que no requiere la impregnación de la madera con una solución. Por lo tanto, es posible mejorar la durabilidad de maderas con baja impregnabilidad, tales como el duramen de muchas frondosas.

La madera termotratada es el proceso de modificación más extendido en la industria. Existen numerosos procesos industriales de modificación térmica: Plato Wood (Holanda), Le Bois Perdure (Canadá), ThermoWood (Finlandia), OHT (Alemania), Royal Process (Alemania) (Menz Holz 2012, Metsawood 2012, PCI Industries Inc. 2012, Plato Wood 2012, Wolman 2012). Los procesos patentados están actualmente aplicados por diversas industrias fabricantes de productos de madera, especialmente en Europa. La utilización de

pino como madera a modificar está ampliamente difundida, y también existen experiencias con *E. grandis* (Calonego *et al.* 2012, de Moura, Brito 2008).

La modificación térmica es probablemente el proceso que más fácilmente se pueda adaptar a la situación de Uruguay. Los requerimientos tecnológicos son sencillos, ya que se requiere un reactor de características similares a una cámara de secado de convección. Además, localmente se producen especies poco durables, pero sumamente homogéneas en cuanto a sus propiedades. La pérdida de propiedades mecánicas que causa el proceso no afectaría mayormente los productos que actualmente se fabrican, ya que en su mayoría no tienen destino estructural.

Madera modificada químicamente

Implica el tratamiento en profundidad con una solución que reaccionará en el interior de la pared celular, disminuyendo la cantidad de receptores químicos de agua, y por lo tanto haciendo la madera menos higroscópica. Asimismo, la madera adquiere mayor resistencia al ataque de hongos e insectos. Debido a la reacción entre la madera y la solución impregnante, se observa una ganancia de masa que es proporcional al aumento de durabilidad alcanzada: a mayor ganancia de masa, mayor durabilidad.

Acetilación

Es la modificación química más difundida, tanto científica como comercialmente. Consiste en impregnar madera con una solución de anhídrido acético para luego hacerla reaccionar en presencia de un catalizador y calor.

La madera acetilada es más estable dimensionalmente y también más durable que la madera sin tratar. Además, conserva su color y no pierde propiedades mecánicas. La madera acetilada de pino radiata, originario de Nueva Zelanda, se comercializa con el nombre de Accoya. Como demostración de su uso estructural, recientemente se fabricó en Holanda un puente para tráfico de vehículos con esta madera. En la región, la madera acetilada ya está disponible para la compra en Chile (Accoya Technologies 2012, Hill 2006, Wagenführ, Scholz 2008).

Polimerización

Otros tratamientos de modificación química se realizan mediante la impregnación de la madera con monómeros que en presencia de un catalizador y de calor, se polimerizan, formando una resina que reacciona con la madera y consigo misma. Ocurre un aumento permanente de volumen y de masa, logrando de esta forma una reducción significativa de la hinchazón y contracción de la madera, además de aumentar la resistencia al ataque de hongos e insectos. Como desventaja, la madera sufre una degradación de sus propiedades mecánicas.

Ejemplos comerciales son la modificación con dimetilol-dihidroxi-etilenurea (DMDHEU) y la furfuralización. El primer proceso se transfirió a la industria de la madera a partir de la industria textil: las fibras de algodón se modifican con DMDHEU para reducir arrugas. El nombre comercial del proceso es Belmadur, desarrollado por BASF de Alemania y aplicado por industrias locales. El segundo proceso tiene como nombre comercial Kebony, originario de Noruega. Como ventaja, utiliza alcohol furfúrico, que se produce a partir de recursos renovables (Hill 2006, Kebony 2012, Muenchinger 2012, Wagenführ, Scholz 2008).

La modificación química es un proceso interesante porque expande los usos de la madera, aumentando su valor. Se alcanzan resultados más ambiciosos que con la modificación térmica. Sin embargo, se trata de procesos relativamente complejos que requieren conocimiento e instalaciones adecuadas. Es probable que en el futuro el uso de la

modificación química se desarrolle para productos específicos de valor agregado, como aberturas y muebles exteriores.

Uruguay podría ser un lugar interesante para la instalación de industrias innovadoras de modificación química de la madera debido a que existe un recurso abundante y homogéneo, cuyo mayor valor está en la apariencia y no en las propiedades estructurales. Como ejemplo, la combinación de un aumento de la durabilidad, empleando una técnica de baja carga ambiental, sumado al diseño local podría generar muebles de madera para exterior, capaces de ser comercializados en el mercado de mayor valor.

5. Referencias

- Accoya Technologies. (2012) Accoya - modified wood by Accsys Technologies. www.accoya.com.
- Annunziatto, W. (2012) Forestal Caja Bancaria. Comunicación personal.
- Balerio, G. (2012) Dank S.A. Comunicación personal.
- Beyer, G., Defays, M., Fischer, M., Fletcher, J., Munck, E. de, Jaeger, F. de, Riet, C. Van, *et al.* (2011) Frente al cambio climático: utiliza madera, 86 p. Bruselas: CEI Bois.
- Boas, I. H. (1947) *The commercial timbers of Australia. Their properties and uses*. Council for Scientific and Industrial Research. Melbourne: J.J. Gourley, Government Printer.
- Böthig, S. (2008) Preservación de madera en Uruguay, 19 p. The International Research Group on Wood Protection, Costa Rica.
- Böthig, S. (2012) Laboratorio Tecnológico del Uruguay. Departamento de Proyectos Forestales. Comunicación personal.
- Böthig, S., Sánchez, A., Doldán, J. (2008) Durabilidad natural de madera de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden de plantaciones de rápido crecimiento. *INNOTEC* **3**, 1–16.
- Bussoni, A., Cabris, J. (2006) Regímenes silvícolas y retorno financiero para *Pinus taeda* en las zonas litoral oeste y noreste de Uruguay. *Agrociencia* **X**(2), 125–135.
- Bussoni, A., Cabris, J. (2010) A financial evaluation of two contrasting silvicultural systems applicable to *Pinus taeda* grown in north-east Uruguay. *Southern Forests* **72**(3-4), 163–171.
- Calonego, F., Durgante, E., Furtado, E. (2012) Decay resistance of thermally-modified *Eucalyptus grandis* wood at 140 °C, 160 °C, 180 °C, 200 °C and 220 °C. *Bioresource Technology* **101**, 9391–9394.
- CEN. (1995) Durabilidad de la madera y de los materiales derivados de la madera. Durabilidad natural de la madera maciza. Parte 2. Guía de la durabilidad natural y de la impregnabilidad de especies de madera seleccionadas por su importancia en Europa (EN 350-2), 44 p. Brussels: Comité Europeo de Normalización.
- CEN. (1999) Estructuras de madera. Madera laminada encolada. Clases resistentes y determinación de valores característicos (EN 1194). Bruselas: Comité Europeo de Normalización.
- CEN. (2004) Eurocode 5. Design of timber structures. (EN 1995-1-1:2004 (E)), 123 p. Brussels.
- CEN. (2010) Madera estructural. Clases resistentes (EN 338), 11 p. Brussels: European Committee for Standardization.
- CEN. (2012) Durability of wood and wood-based products - Use classes: definitions, applications to solid wood and wood based panels (FprEN 335:2012). Brussels: European Committee for Standardization.
- Coggings, C. R. (2008) Trends in timber preservation - a global perspective. *Journal of Tropical Forest Science* **20**(4), 264–272.

- Consejo Europeo. (2006) *Relativo al registro, la evaluación, la autorización y la restricción de las sustancias y preparados químicos (REACH)*, 852 p.
- Cuffré, A. G., Calvo, C. F., Genovese, F., Dorado, M. L., Piter, J. C. (2010) Caracterización de la durabilidad natural de la madera de *Eucalyptus grandis* de Argentina para su utilización en construcciones. VI Congreso Internacional sobre patología y recuperación de estructuras, Córdoba, Argentina.
- Dank S.A. (2012) Dank S.A. www.dank.com.uy.
- Diesen, M. (2007) *Economics of the Pulp and Paper Industry*, 2nd, Vol. 1. Finland: Finnish Paper Engineers' Association.
- Echeverría, R. (2012) Dirección General Forestal. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. Comunicación personal.
- Elhordoy, J. (2012) Cambium - Global Forest Partners. Comunicación personal.
- FAO. (2011) *State of the World's Forest 2011*. Roma.
- FAO. (2012) Anuario de Productos Forestales 2006-2010 (45). FAO Forestry Series, 344 p. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Fernández-Golfín, J. I., Díez, M. R., Hermoso, E. (2003) Normas aplicables a las estructuras de madera laminada encolada (221). Boletín de información técnica, 56–59 p. Madrid: AITIM.
- Forest Products Laboratory. (2010) *Wood Handbook - Wood as Engineering Material*. Madison: USDA - FPL.
- Frühwald, A., Ressel, J. B., Bernasconi, A. (2003) Hochwertiges Brettschichtholz aus Buchenholz, 181 p. Hamburgo: Bundesministerium für Bildung und Forschung.
- Hill, C. (2006) *Wood modification. Chemical, Thermal and Other Processes*. John Wiley&Sons.
- Hirigoyen, A. (2012) *Sistema de Apoyo a la Gestión (SAG) Grandis*. Tacuarembó, Uruguay: Instituto de Investigación Agropecuaria.
- Ibáñez, C., Mantero, C., Bianchi, M., Kartal, N. (2009) *Madera, biodeterioro y preservantes*. Montevideo: Hemisferio Sur.
- Kebony. (2012) Kebony. www.kebony.com.
- Lebow, S., Lebow, P., Foster, D. (2008) Estimating preservative release from treated wood exposed to precipitation. *Wood and Fiber Science* **40**(4), 562–571.
- Leckey, D. (1998) *Buying&Selling Softwood Lumber. A guide to the Lumber Market of North America*. Eugene, USA: Random Lengths.
- López, N. (2012) Urufor S.A. Comunicación personal.
- Lorenzo, D., Troya, M. T., Piter, J. C., Sánchez, M., Baso, C. (2009) *Study of the natural durability of Eucalyptus grandis wood from Argentina*. IRG 40th Annual Meeting, Beijing, China.
- Menz Holz. (2012) OHT. www.menzholz.de.

- Metsawood. (2012) Thermowood. www.metsawood.com.
- MGAP. (2012) Superficie registrada en la Dirección Forestal con Plan de Manejo por departamento y sección judicial 1975-2010. www.mgap.gub.uy
- Ministerio de Industria, Energía y Minería. (2012) *Planes Industriales - Fase I*. Mastergraf S.R.L.
- Morás, G. (2012) Departamento Forestal, Facultad de Agronomía, Universidad de la República Oriental del Uruguay. Comunicación personal.
- Moura, L. de, Brito, J. (2008) Effect of Thermal Treatment on Machining Properties of Eucalyptus grandis and Pinus caribaea var. hondurensis Woods, 9 p. 51st International Convention of Society of Wood Science and Technology, Concepción, Chile.
- Muenchinger. (2012) Muenchinger. www.muenchinger-holz.de.
- O'Neill, H., Quagliotti, S. (2009) Alternativas para dar valor agregado a la madera nacional proveniente de árboles de raleos comerciales, 84 p. LATU. Sector de Productos Forestales.
- O'Neill, H., Tarigo, F., Trambauer, C. (2003) Propiedades mecánicas de Pinus taeda L. del litoral de Uruguay (2), 48 p. LATU. Sector de Productos Forestales.
- PCI Industries Inc. (2012) Le Bois Perdure. www.perdure.com.
- Plato Wood. (2012) Plato Wood. www.platowood.nl.
- Posse, J. P. (2012) Weyerhaeuser S.A. Comunicación personal.
- Raíces S.R.L. (2012) Raíces S.R.L. www.raices.com.uy.
- Sánchez, M., Mastrandea, C., Lima, J. (2008) Wood technologies and uses of Eucalyptus wood from fast grown plantations for solid products, 12 p. 51st International Convention of Society of Wood Science and Technology, Concepción, Chile.
- Sarries, M. (2012) Urupanel S.A. Comunicación personal.
- Schreiber, D., Mallo, M., Rossi, G., Ciganda, C., Suárez, I., Böthig, S., Martínez, J., et al. (2007) *Guía de Buenas Prácticas en Impregnación de Madera. Tomo 1: Seguridad y Salud Ocupacional*. Cooperación Técnica Mercosur-Alemania, Vols. 1-2, Vol. 2. Uruguay: Dirección Nacional de Medio Ambiente.
- Schreiber, D., Mallo, M., Rossi, G., Ciganda, C., Suárez, I., Böthig, S., Martínez, J., et al. (2007) *Guía de Buenas Prácticas en Impregnación de Madera. Tomo 1: Seguridad y Salud Ocupacional*. Cooperación Técnica Mercosur-Alemania, Vols. 1-2, Vol. 1. Uruguay: Dirección Nacional de Medio Ambiente.
- Scoz, R. (2012) Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria. Programa Forestal. Comunicación personal.
- Sierolam. (2012) Sierolam. www.sierolam.com.
- UNECE/FAO. (2011) Forest Products Annual Market Review 2010-2011, 155 p. Geneva: UNECE/FAO.

- UPM, Forestal Oriental. (2010) Informe de Responsabilidad Social y Ambiental 2010. UPM, Forestal Oriental.
- Urufor S.A. (2012) Urufor S.A. www.urfor.com.
- Uruguay XXI. (2012) Estadísticas de comercio exterior. Uruguay XXI.
- US Environmental Protecting Agency. (2012) Chromated Copper Arsenate (CCA). www.epa.gov
- Wagenführ, A., Scholz, F. (2008) *Taschenbuch der Holztechnik*. Munich: Hanser.
- Wegener, G., Glos, P., Tratzmiller, M. (2009) Hochwertige Bauprodukte aus Massivholz und Holzwerkstoffen aus starkem Stammholz (Teilproject 14), 150 p. Munich, Alemania: Holzforschung München - TUM.
- Wolman. (2012) Royal Process. www.wolman.de.
- Zarandona, J. (2012) Importador europeo de madera. Comunicación personal.