



UNIVERSIDAD
SAN SEBASTIAN

SEDE CONCEPCIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

Formulación y caracterización de materiales con base en plástico madera

Memoria para Optar el Título de Ingeniero Civil

Profesor Guía: PhD Johanna Castaño Agudelo

Alumno: Tania Jacqueline Ceballos Troncoso

Concepción, Enero 2019

© Tania Jacqueline Ceballos Troncoso

Se autoriza la reproducción parcial o total de esta obra, con fines académicos, por cualquier forma, medio o procedimiento siempre y cuando se incluya cita bibliográfica del documento.

HOJA DE CALIFICACIÓN

En Concepción, el ____ de ____ de ____, los abajo firmantes dejan constancia que la alumna Tania Jacqueline Ceballos Troncoso de la carrera Ingeniería Civil ha aprobado la memoria para Optar al título de Ingeniero Civil con una nota de _____.

Profesor PhD Johanna Castaño Agudelo

Profesor MSc Patricio Uarac Pinto

RESUMEN

La gran cantidad de residuos plásticos que se encuentran dispersos en la superficie terrestre ha generado una enorme contaminación al medio ambiente, es por esto que se han realizado estudios con el fin de poder reutilizar este material que posee gran resistencia a la degradación. La incorporación de madera a estos desechos poliméricos dieron lugar a un nuevo material con propiedades superiores a sus componentes por separado, el llamado compuesto plástico madera (WPC), el cual posee características similares a la madera pero con las propiedades del plástico.

Los plásticos utilizados en la fabricación del compuesto, son polímeros termoplásticos, los cuales tienen la capacidad de ablandarse con el calor. Estos polímeros son mezclados con madera en distintas proporciones y se añaden aditivos a su formulación como, compatibilizantes (para facilitar la unión de los materiales) y funcionales (para mejorar algunas propiedades y apariencia física); el comportamiento del compuesto final va a depender del tipo y porcentaje de materiales a utilizar.

Los polímeros más utilizados actualmente para la fabricación del compuesto plástico madera son, Polietileno (PE), Polipropileno (PP) y Cloruro de Polivinilo (PVC) ya que, presentan temperaturas de fusión inferior a los 200°C, requisito para que no se degraden las fibras de madera.

Sus principales usos son en perfiles de puertas y marcos de ventanas, perfiles de *decking*, mobiliario interior y todo tipo de revestimientos exterior.

La utilización de residuos conlleva a una economía circular, generando nuevas fuentes de ingreso y trabajo.

Palabras claves: Compuesto plástico madera, reciclaje, residuos, termoplásticos

ABSTRACT

The large amount of plastic waste that is scattered on the Earth's surface has been generated a lot in the environment, it is because studies have been conducted in order to reuse this material that has great resistance to degradation. The incorporation of wood to these polymer waste resulted in a new material with properties superior to its components separately, the so-called wood plastic composite (WPC), which has characteristics similar to wood but with the properties of plastic.

The plastics used in the manufacture of the compound, are thermoplastic polymers, which have the ability to soften with heat. These polymers are mixed with wood in different proportions and additives are added to their formulation as, compatibilizers (to facilitate the union of materials) and functional (to improve some properties and physical appearance); the behavior of the final compound will depend on the type and percentage of materials to be used.

The polymers most used at the moment for the manufacture of the wood plastic compound are, Polyethylene (PE), Polypropylene (PP) and Polyvinyl Chloride (PVC) since, they present melting temperatures lower than 200 ° C, requirement so that they do not degrade the wood fibers.

Its main uses are in door profiles and window frames, decking profiles, interior furniture and all types of exterior cladding.

The use of waste leads to a circular economy, generating new sources of income and work.

Keywords: Wood plastic composite, recycling, waste, thermoplastics

AGRADECIMIENTOS

En este momento de mi vida sólo me queda dar las gracias por todo el apoyo brindado en estos largos años universitarios.

En primer lugar, a mis padres, quienes nunca dejaron de creer en mí y apoyaron cada decisión que tomé, siempre con gran sabiduría. Como dice mi padre: "hija, cada persona tiene su tiempo" y mi tiempo es este. Así que sólo dar mis infinitas gracias a ellos; a mi pololo, que desde que lo conocí mi vida cambió, su fortaleza me hizo crecer y su energía positiva me ayudó a creer en mí, a creer que era capaz de lograr todo lo que propusiera. Mil gracias por todo mi Marcelito; no puedo dejar de mencionar a las mejores amigas que pude tener en la universidad y que sin duda serán para toda la vida, mi amiga Melisa, Flor, Loreto y Paulina que en este último tiempo se han convertido en mi segunda familia, preocupadas de todo y siempre dando ánimo, son las más apañadoras y positivas, doy gracias a Dios de haberlas conocido; y por último, a mis profesores, en especial al profesor Patricio Uarac que ha estado tan cercano a todas nosotras, el cual nos brindó toda la ayuda sin tener la necesidad de hacerlo y, a la profesora guía, Johanna Castaño, por ser la más jugada con nosotros (sus alumnos de proyecto de título), siempre tan amorosa y comprensiva, sin el apoyo de todos nada de esto sería posible.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Motivación.....	3
1.2	Objetivo general.....	3
1.3	Objetivos específicos	3
1.4	Metodología.....	4
CAPÍTULO 2	MARCO TEÓRICO	5
2.1	Introducción	5
2.2	Revisión bibliográfica	5
2.2.1	Compuesto plástico madera	5
2.2.2	Plásticos	8
2.2.3	Residuos plásticos a nivel mundial.....	12
2.2.4	Situación en Chile.....	14
2.2.5	Madera	14
CAPÍTULO 3	SITUACIÓN DE LA INDUSTRIA FORESTAL EN CHILE.....	16
3.1	Principales especies exóticas introducidas a Chile	17
3.1.1	<i>Pinus radiata</i> D.Don (pino radiata).....	17
3.1.2	<i>Eucalyptus globulus</i> (eucalipto).....	18
3.2	Las plantaciones forestales en Chile	18
3.2.1	Volúmenes de residuos madereros aprovechables.....	19
CAPÍTULO 4	ADITIVOS.....	23
4.1.1	Compatibilizantes o agentes de acoplamiento	23
4.1.2	Funcionales	24
CAPÍTULO 5	DESARROLLO DE MATERIALES EN BASE A WPC	25
5.1	Formulación.....	25
5.2	Procesamiento WPC.....	28
5.2.1	Extrusión	29

Índice

5.2.2	Moldeo por inyección	29
5.2.3	Moldeo por compresión	29
5.3	Propiedades de los WPC	30
5.3.1	Propiedades mecánicas	30
5.3.2	Propiedades físicas	31
5.4	Caracterización del material compuesto	32
5.4.1	Mecánica.....	33
5.4.2	Térmica.....	37
5.4.3	Estructural (química)	39
5.4.4	Morfológica	40
5.4.5	Reológica	41
5.5	Humectabilidad	43
CAPÍTULO 6 IMPACTO AMBIENTAL, SOCIAL Y ECONÓMICO		45
6.1	La industria del plástico	45
6.1.1	Cifras del problema en Chile.....	48
6.2	Economía y residuos	48
6.2.1	Economía Circular	50
6.3	Análisis económico	52
CAPÍTULO 7 CONCLUSIONES		54

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1: Volumen de residuos madereros generados por la industria del aserrío	20
Tabla 3.2: Destino de residuos madereros según tipo de residuo	22
Tabla 4.1: Clasificación de aditivos según su función.....	24
Tabla 5.1: Resumen de las concentraciones óptimas.....	28
Tabla 6.1: Resumen del impacto social, económico y ambiental de los materiales que componen el WPC	51
Tabla 6.2: Comparación de precios en Chile de los distintos materiales.	53

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Resumen de la metodología a utilizar.....	4
Figura 2.1: Elementos que constituyen el compuesto plástico madera.	6
Figura 2.2: Clasificación de plásticos según su resistencia a temperatura y estructura interna	10
Figura 2.3: Estructura del polietileno.....	12
Figura 2.4: Estructura del polipropileno	12
Figura 2.5: Estructura de cloruro de polivinilo	12
Figura 2.6: Grafico de destinos de los desechos plásticos en el mundo.....	13
Figura 3.1: Grafico de la distribución de residuos madereros por región.....	21
Figura 5.1: Imagen de ensayos mecánicos de una muestra de compuestos madera y plástico ; (a) prueba de flexión y (b) prueba de tracción	34
Figura 5.2: Muestra de fractura extensible de WPC con LDPE como matriz.....	35
Figura 5.3: Imagen de WPC a la intemperie natural	36
Figura 5.4: Grafico de DSC de mezcla de polímeros reciclados.....	39
Figura 5.5: muestra de WPC con 15% de fibra de madera sin agente acoplante.	41
Figura 5.6: muestra de WPC con 15% de fibras de madera y 5% de agente acoplante MAPE. a) Sentido longitudinal y b) sentido transversal	41
Figura 6.1: Imágenes microscópicas de microesferas microplásticas ingeridas por especies marinas	46
Figura 6.2: Un modelo conceptual de las rutas tróficas potenciales de los microplásticos a través de vertebrados marinos e invertebrados	47
Figura 6.3: mapa conceptual de economía circular	50
Figura 6.4: Instalación de los clip sobre las vigas.	52

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

La necesidad de desarrollar compuestos ecológicos para preservar el medio ambiente ha llevado al estudio, creación y producción de nuevos materiales.

La industria maderera produce una gran cantidad de residuos, provenientes de plantas de celulosa, aserraderos, producción de tableros, etc. Se conoce como residuos de madera a todo aquellos que se generan como consecuencia de actividades propias del sector y que, por sus características, solo era posible de ser utilizada para generar energía, sin embargo hace un tiempo se ha comenzado a incorporar estos residuos a otros materiales, como el plástico, con el fin de incrementar sus propiedades y ser una alternativa a la madera, este es el caso del *wood plastic composites* (compuesto plástico madera; WPC según sus iniciales en inglés).

Plástico madera es un compuesto que lleva años produciéndose en distintos países, su inicio data en los años 60 en Estados Unidos, siendo el país con mayor producción, su expansión hacia Europa y resto de países de América es producto del bajo costo de la materia prima, ya que se utilizan residuos tanto de madera como de polímeros. Su principal uso es para el exterior, ya que resiste mejor la intemperie que otros elementos más convencionales; comparada con la madera tradicional presenta mayor resistencia al ataque fungicida, a la humedad, rayos del sol, e inclemencias climáticas, no presentan pudrición, deformación y astillados. El PP y el PS presentan mayor resistencia a la intemperie (exposición a los rayos ultravioleta y humedad) y cargas mecánicas (tensiones) en comparación con el PE y el PVC (Ratanawilai & Taneerat, 2018).

Las propiedades del compuesto dependen principalmente del tipo de material a utilizar y el porcentaje de madera, plástico y aditivo dentro del material final.

Capítulo 1: Introducción

Chile posee una gran cantidad de hectáreas de plantación forestal (3 millones aproximadas), lo que lo hace un país muy atractivo para la producción del compuesto. El 98% del consumo de maderas en Chile está dado *Pinus radiata* D. Don (pino), *Eucalyptus globulus* y *Eucalyptus nitens*.

Si bien las grandes industrias de la madera hoy en día utilizan estos residuos para producir biomasa, para generar energía, existen muchos aserraderos e industrias de menor escala que no lo aprovechan y quedan como desechos en el lugar de trabajo, donde son amontonados en hileras o quemados de manera “controlada”. Sin embargo, esto trae consigo grandes riesgos, ya que, la acumulación de estos desechos puede provocar incendios, plagas o enfermedades que pueden amenazar el nuevo cultivo, y la quema de éstos, producto de las altas temperaturas, tiene como consecuencia la pérdida de nutrientes del suelo lo que, puede provocar erosión.

Los plásticos son polímeros compuestos de macromoléculas, que se subdividen en unidades más pequeñas llamadas monómeros, existen dos tipos, los naturales y los sintéticos, y según su composición interna y su resistencia a las altas temperaturas se clasifican en, termoplásticos, termoestables y elastómeros. Alrededor del 90% de los plásticos se pueden reciclar y los más utilizados para producir WPC son los llamados polímeros termoplásticos, ya que estos tienen la capacidad de fundirse con el calor, quedando en un estado líquido viscoso, pudiendo así darle la forma deseada, este es un proceso reversible y cíclico, puede ocurrir varias veces sin que pierda significativamente sus propiedades.

Los plásticos en vertederos municipales tardan alrededor de 500 años en degradarse por lo que su reutilización es de gran importancia para el medio ambiente.

Capítulo 1: Introducción

1.1 Motivación

Generar conocimiento sobre desarrollos que hay en la composición del compuesto plástico madera. Conocer el impacto socioeconómico y ambiental de estos materiales. Mostrar la materia prima con que cuenta Chile para el estudio y desarrollo de este material.

1.2 Objetivo general

Identificar los elementos que constituyen la formulación, la concentración de cada elemento dentro de la formulación y los desarrollos con mayor impacto.

1.3 Objetivos específicos

- i. Identificar y recomendar una formulación óptima de materiales compuestos madera plástico, basado en la teoría.
- ii. Identificar técnicas de caracterización de los materiales.
- iii. Estudiar el impacto socioeconómico y ambiental de los desarrollos de los materiales compuestos madera plástico.

1.4 Metodología

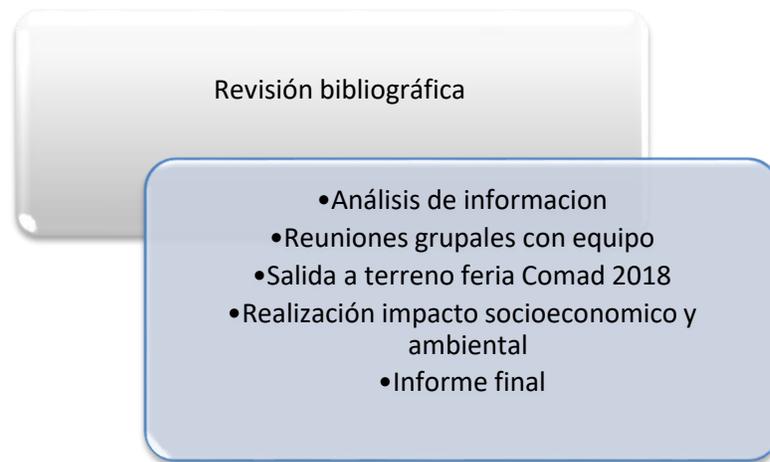


Figura 1.1: Resumen de la metodología a utilizar (elaboración propia).

Recopilar información a través de revisión bibliográfica del compuesto plástico madera, analizar y compartir dicha información en reuniones grupales con el fin de intercambiar opiniones, para obtener una retroalimentación de ideas. En primer lugar, se recopilará información general de WPC, para luego indagar en los elementos que lo componen (plástico, madera y aditivos), estudiando sus propiedades, características y formulaciones, con el fin de responder a los objetivos del presente proyecto de título. Además, se realizará un estudio de impacto socioeconómico y ambiental de los materiales que constituyen el compuesto, para ello se recopilarán cifras de los residuos a nivel mundial y local.

Se realizará una visita a la feria Comad 2018 con el objetivo de visualizar materia prima y conocer las distintas empresas que constituyen el rubro de la madera.

Toda la información analizada y recopilada se resumirá en un informe y se realizará una presentación final.

CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

2.1 Introducción

La revisión bibliográfica que se presenta a continuación tiene como objetivo dar a conocer los polímeros termoplásticos más utilizados, las principales especies forestales introducidas a Chile, cuáles son los aditivos (compatibilizantes y funcionales) más empleados, las concentraciones de cada elemento dentro del compuesto y cómo influyen estas concentraciones en las características del compuesto final.

2.2 Revisión bibliográfica

2.2.1 Compuesto plástico madera

La madera compuesta consta de dos fases, una polimérica denominada matriz (primaria) y otra de refuerzo (secundaria) constituida de fibra o polvo de madera, además de la utilización de un agente de acoplamiento para poder lograr la compatibilidad entre ambos (Fig.2.1).

Capítulo 2: Marco Teórico

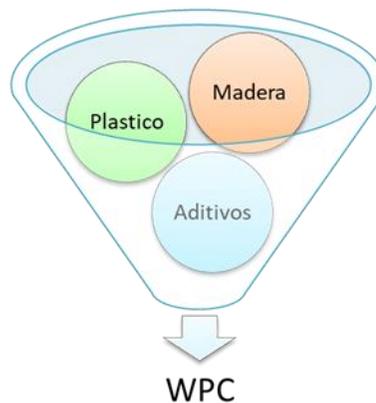


Figura 2.1: Elementos que constituyen el compuesto plástico madera (elaboración propia).

Las fibras de madera, usadas como relleno, fueron inicialmente utilizadas para reducir la densidad y los costos de los productos, pero se descubrió que el relleno de madera mejora el desempeño mecánico de los productos cuando se utiliza un agente de acoplamiento para mejorar la compatibilidad entre la matriz polimérica y el relleno. Incorporando fibras de madera en una matriz polimérica, la rigidez y otras propiedades mecánicas del compuesto, pueden ser significativamente mejoradas (Cruz, Alonso, Estrada, & Zitzumbo, 2016).

Los WPC son muy atractivos ambiental y económicamente ya que, tanto la fase primaria como la secundaria suelen ser de materiales reciclados o desechos.

Los primeros compuestos de madera y plástico se vieron por primera vez en los años 60 en Estados Unidos, siendo el país con mayor producción. Su expansión hacia Europa y resto de países de América se produjo por el bajo costo de la materia prima y porque éste nuevo material poseía la misma apariencia de la madera, pero con menor costo por utilizar desperdicios de maderas y plásticos.

Capítulo 2: Marco Teórico

Los materiales plásticos que se utilizan para la creación de la madera plástica provienen en un 90% de un proceso de reciclaje, lo cual hace que su costo se reduzca. Lo que se logra con el material es eliminar la tala excesiva de bosques ya que la madera plástica logra ser una alternativa a la madera natural, pero con propiedades mejoradas. (Rodríguez & Gamba, 2008)

Su principal uso es para el exterior, ya que resiste mejor la intemperie que otros elementos más convencionales, comparada con la madera tradicional presenta mayor resistencia al ataque de plagas, a la humedad, rayos del sol, e inclemencias climáticas, no presentan pudrición, deformación, astillados y no requieren mantenimiento (Martínez, R., Álvarez, García, & Martínez, 2014). Un ejemplo de su utilización es el recubrimiento de superficies que se encuentran a la intemperie, siendo ampliamente utilizados en muelles, terrazas, y otras superficies cerca de piscinas o en centros de recreación.

Los polímeros utilizados para la fabricación de WPC son termoplásticos ya que, estos se pueden fundir con el calor, quedando en un estado líquido-viscoso al que se le puede otorgar fácilmente la forma deseada. La temperatura para ser moldeado es inferior a 200°C, requisito debido a la baja estabilidad térmica de las fibras de madera (Yañez, 2016). Los termoplásticos más utilizados en todo el mundo para fabricar WPC son, polietileno (PE), cloruro de polivinilo (PVC) y polipropileno (PP) (Yañez, 2016), termoplásticos sintéticos basados en fósiles. Además de la madera y el plástico, el compuesto posee pequeñas cantidades de aditivos (menor a 5%) que afectan el proceso de fabricación y las características del producto.

El porcentaje de madera de WPC varía normalmente desde un 20 hasta un 60%, tanto en forma polvo como de fibras cortas (inferiores a 5 mm), aunque 50/50 es el más común. La alta participación de fibra es de suma importancia por la presión sobre los recursos escasos y aún más interesante es que el compuesto en sí mismo puede volver a reciclarse.

Capítulo 2: Marco Teórico

Además, cabe destacar que para producir WPC se utiliza una cantidad de energía mucho menor en comparación con materiales de construcción convencionales, como el metal y cemento. Un ejemplo de esto, el WPC se compone a 180°C aproximados mientras que el cemento se sintetiza a 1200°C (Friedrich & Luible, 2016).

Las propiedades del compuesto dependen principalmente del porcentaje de madera, plástico y aditivo dentro del material final.

2.2.2 Plásticos

Los plásticos son polímeros de elevado peso molecular, su nombre procede de las palabras griegas poli que significa muchas y mero que significa partes (Yañez, 2016), está compuesto de macromoléculas, las cuales se subdividen en unidades más pequeñas llamadas monómeros que se repiten en todo lo largo de la estructura polimérica.

Dependiendo de su origen, los polímeros pueden ser naturales o sintéticos. Los sintéticos contienen normalmente entre uno y tres tipos diferentes de unidades que se repiten, se elaboran a partir del compuesto del petróleo (la mayoría de los plásticos pertenecen a este grupo), mientras que los naturales o biopolímeros (como el ADN, la celulosa o las proteínas) presentan estructuras muchas más complejas. Los polímeros sintéticos tienen mayor interés desde el punto de vista comercial (Beltrán & Marcilla, 2012). Los polímeros además se clasifican según su resistencia a la temperatura y composición interna, distinguiéndose tres tipos, termoplásticos, termoestables y elastómeros.

Termoplásticos: Son polímeros lineales que pueden estar ramificados o no. Son solubles en algunos disolventes orgánicos y su mayor característica es que tienen la capacidad de fundirse o ablandarse con el calor y endurecerse al

Capítulo 2: Marco Teórico

enfriarse, es un proceso repetitivo y cíclico, por tanto, reciclables. Estos materiales normalmente se fabrican con aplicación simultánea de calor y de presión. A nivel molecular a medida que la temperatura aumenta, la fuerza de los enlaces secundarios se debilita (por que la movilidad molecular aumenta) y esto facilita el movimiento relativo de las cadenas adyacentes al aplicar un esfuerzo. La degradación irreversible se produce cuando la temperatura de un termoplástico fundido se eleva hasta el punto que las vibraciones moleculares son tan violenta que pueden romper los enlaces covalentes. Los termoplásticos son relativamente blandos y dúctiles (Fig. 2.2) (Callister, 2007).

Elastómeros: Son generalmente compuestos que contienen dobles enlaces en la cadena principal, de modo que las cadenas de polímeros se encuentran enrolladas sobre sí mismas, lo cual les confiere gran flexibilidad. Estos materiales son capaces de soportar deformaciones muy grandes recuperando su forma inicial al retirar el esfuerzo aplicado. En los elastómeros, suele producirse un entrecruzamiento parcial de las cadenas para evitar que, cada vez que estos materiales se ven sometidos a un esfuerzo, las moléculas se deslicen unas sobre otras, lo que provocaría deformaciones irre recuperables. El entrecruzamiento de las moléculas es similar al de los termoestables pero mucho más bajo, puesto que debe ser suficientemente espaciado, de modo que no impida el desenrollamiento de las cadenas, que es lo que le da la capacidad de recuperar su forma inicial cuando cesa el esfuerzo al que es sometido. (Beltrán & Marcilla, 2012) (Fig.2.2).

Termoestables: Corresponde a moléculas entrelazadas en una organización tridimensional, esta estructura se conserva de manera permanente y es un proceso irreversible, La respuesta de un termoestable a una temperatura lo suficientemente elevada formara una estructura que al ser recalentada no modificara su forma, más bien si se incrementan las temperaturas lo suficiente, el polímero termoestable comenzara a quemarse, degradarse y carbonizarse. Los plásticos termoestables en general poseen mejores propiedades mecánicas,

Capítulo 2: Marco Teórico

térmicas y químicas, resistencia eléctrica y estabilidad dimensional que los termoplásticos. Productos comunes fabricados con este polímero son las manijas y perillas de las cacerolas y sartenes, así como componentes de interruptores de la luz. (Kalpakjian & Schmid, 2002) (Fig.2.2).

Las propiedades mecánicas de los polímeros dependen, fundamentalmente, de su composición, estructura, condiciones de procesado, velocidad de aplicación de los esfuerzos y temperatura. Como línea general, al aumentar la temperatura, la resistencia a la tracción disminuye, mientras que la elongación aumenta. (Beltrán & Marcilla, 2012)

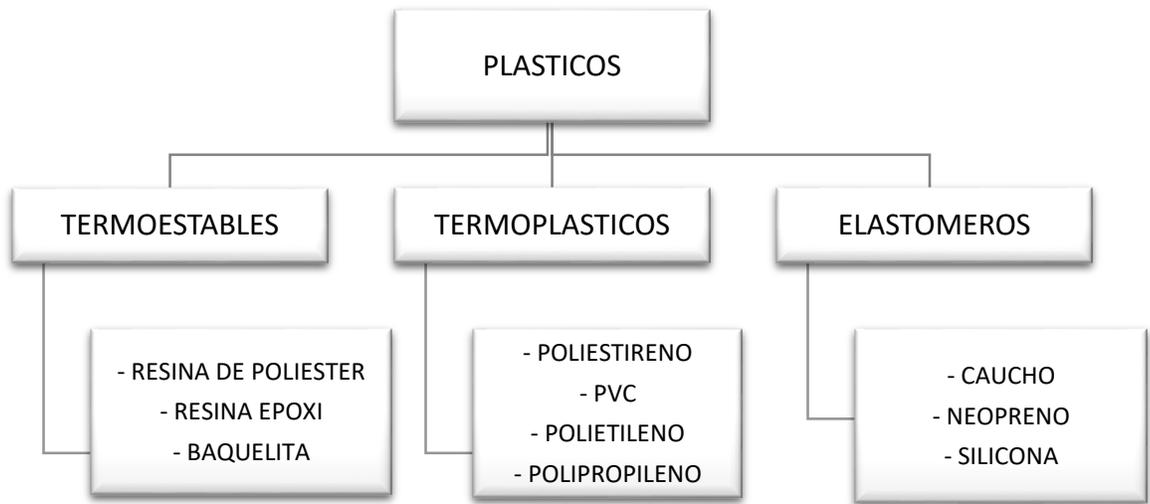


Figura 2.2: Clasificación de plásticos según su resistencia a temperatura y estructura interna (elaboración propia).

El PE, el PP y el PVC son los termoplásticos más utilizados para fabricar WPC, esto es por que poseen temperaturas de fusión inferiores a 200 °C, requisito importante por la baja estabilidad térmica de la madera (Solís & Lisperguer, 2005).

Polietileno (PE): Es el plástico más producido en todo el mundo y se trata de un polímero semicristalino, es un material bastante blando, lo que hace que sea fácilmente procesable. Su estructura es básicamente una cadena lineal de CH₂ con dos CH₃ terminales. Posee una baja temperatura de fusión que oscila entre 105 y 130 °C, esto le permite mezclarse con fibras de madera y celulosa sin que estas sufran ningún tipo de degradación durante el procesado del material compuesto (Yañez, 2016). Posee buenas propiedades eléctricas y químicas, sus propiedades mecánicas dependen de la composición y de la estructura. Las dos clases principales son (a) baja densidad (LDPE), (b) alta densidad (HDPE), Sus aplicaciones típicas son de uso doméstico en botellas, botes de basura, juguetes, tuberías, etc. (Kalpakjian & Schmid, 2002) (Fig.2.3).

Polipropileno (PP): Tiene buenas propiedades mecánicas, eléctricas y químicas y buena resistencia al desgarramiento. Las aplicaciones incluyen partes de automóviles, decoración, material médico, aislamiento de conductores, tuberías, vasos para bebidas, recipiente de productos lácteos y jugos, cuerdas, equipaje, etc. (Kalpakjian & Schmid, 2002). Posee mejor resistencia a la fluencia, es menos resbaladizo y más resistente al deterioro, a pesar de ello, es más frágil que el polietileno especialmente a temperaturas bajas y es demasiado rígido para algunas aplicaciones. El PP presenta una estructura con un grupo metilo pendiente (Fig. 2.2), su rango de fusión es entre 140 y 155 °C. Por su baja absorción de agua lo hace un material muy interesante para producir WPC (Yañez, 2016) (Fig.2.4).

Cloruro de polivinilo (PVC): Es de bajo costo y resiste al agua, se puede fabricar rígido o flexible, no es adecuado para aplicaciones que requieran resistencia mecánica y el calor. El PVC rígido, es resistente y duro; su utiliza en la industria de la construcción (Tuberías y conductos). El PVC flexible se utiliza en revestimiento de alambres y cables, en tuberías y mangueras de baja presión, calzado, entre otros. (Kalpakjian & Schmid, 2002). Una ventaja del PVC es su resistencia a la llama debido a su alto contenido de cloro, aunque a la vez se

Capítulo 2: Marco Teórico

considera dañino para el medio ambiente, debido a la posibilidad de formación de cloruro de hidrogeno. Posee una estabilidad térmica reducida y es bastante frágil (Yañez, 2016) (Fig. 2.5).

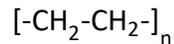


Figura 2.3: Estructura del polietileno
(Yañez, 2016).

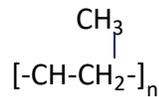


Figura 2.4: Estructura del polipropileno
(Yañez, 2016).

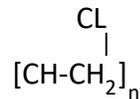


Figura 2.5: Estructura de cloruro de polivinilo
(Yañez, 2016).

2.2.3 Residuos plásticos a nivel mundial

Desde 1950, que es cuando se empezó a utilizar este material, se han producido en el mundo más de 8.000 millones de toneladas de plástico de todo tipo y de esta cantidad solo el 9% se recicla (Fig.2.6). El Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) busca la eliminación de estos residuos, mismos que generan el 90% de la basura marina en los océanos del planeta (PNUMA, 2017).

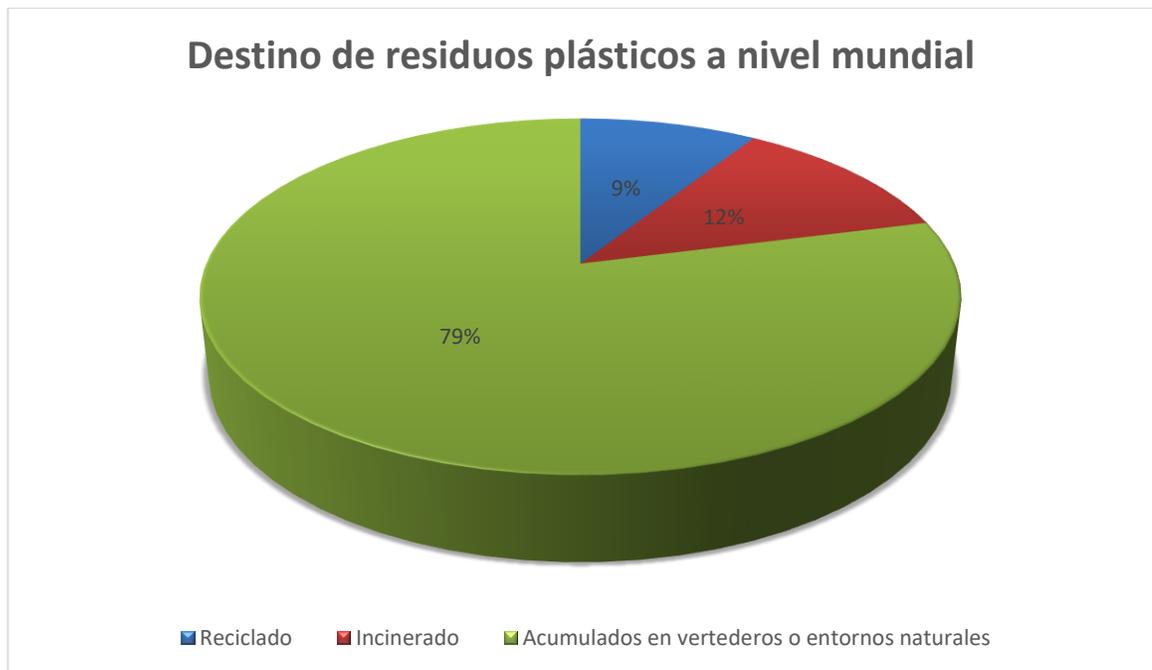


Figura 2.6: Gráfico de destinos de los desechos plásticos en el mundo
(Jiménez, E, 2017).

Más del 99% de los plásticos se producen a partir de productos químicos derivados del petróleo, el gas natural y el carbón, los cuales son recursos no renovables, por lo que para el 2050 se espera que la industria del plástico consumirá el 20% de la producción del petróleo del mundo (ONU Medio ambiente, 2018) . Además se estima que para el mismo año (2050), la cifra aumente a 12.000 millones de toneladas de residuos plásticos (PNUMA, 2017). Arandes et al. (2004) afirma:

El espectacular aumento en el consumo de los plásticos en la sociedad moderna que se estima crece un 4% anualmente, se ha producido en paralelo con el desarrollo tecnológico de estos materiales, cuyo uso se ha extendido además de en el campo ya convencional de los envases, en la fabricación de componentes en las industrias de automoción, vivienda, vestido y todo tipo de bienes de consumo. (p.28)

Capítulo 2: Marco Teórico

Sin embargo, el éxito en el desarrollo tecnológico no ha ido de la mano con la recuperación de los plásticos, siendo una de las mayores fuentes de contaminación a nivel mundial y por ende de preocupación de autoridades y científicos que han buscado alternativas para su reutilización.

2.2.4 Situación en Chile

En Chile se utilizan 3400 millones de bolsas plásticas al año, de estas el 7% va a parar a vertederos y rellenos sanitarios. Los termoplásticos de mayor producción industrial en Chile son, polietileno de alta densidad (HDPE) y polipropileno (PP) (ONU, 2018).

Una cantidad importante, 25 mil toneladas de plásticos terminan en el mar cada año. Se ha reportado la presencia de 5000 piezas de plástico por kilómetro cuadrado en el océano a una distancia aproximada de unos mil kilómetros de la costa de Chile, y en las cercanías de la Isla de Pascua este valor llega a las 50.000 piezas por kilómetro cuadrado (ONU, 2018).

Chile acaba de anunciar una ley que prohíbe el uso de bolsas plásticas. El congreso aprobó el 30 de mayo de este año, la prohibición de bolsas plásticas de un solo uso en todo el territorio nacional.

2.2.5 Madera

La madera es un recurso renovable es un compuesto biológico celular jerárquico, se encuentra compuesta por celulosa, que es un carbohidrato que ocupa más de la mitad de su materia total; lignina que proporciona dureza y protección y hemicelulosa que actúa como unión de las fibras, más otras sustancias que se presentan en menor cantidad, este tipo de estructura proporciona a la madera

Capítulo 2: Marco Teórico

una alta fuerza con una mínima cantidad de material (Yañez, 2016). La madera es un material heterogéneo, anisótropo y ortótropo cuyas características van a depender de la especie y dentro de la misma especie del lugar donde se encuentre.

Los componentes de la madera son fácilmente degradables por microorganismos y también son susceptibles de ser dañados por el fuego. Por otro lado, debido al grupo hidroxilo en las paredes celulares de la madera, el material cambia sus dimensiones, por lo que al secarse la madera se contrae y al humedecer la madera hincha (Yañez, 2016).

Maderas blandas: Suelen ir destinadas a usos industriales. Son de rápido crecimiento, manipulación más sencilla y durabilidad menor, producen muchas más astillas y su atractivo es menor que las maderas duras. Algunas de las maderas blandas más utilizadas son el pino, el álamo y el eucaliptus (Rahal & Sleiman, 2013).

Maderas duras: Son de crecimiento lento, se utilizan para el diseño de muebles y la construcción, poseen un tratamiento más complicado, pero resisten de mejor manera el paso del tiempo ya que, presentan mayor dureza, Algunas de las maderas duras más utilizadas son las de nogal, roble, fresno o cerezo (Rahal & Sleiman, 2013).

CAPÍTULO 3 SITUACIÓN DE LA INDUSTRIA FORESTAL EN CHILE

Chile cuenta con 16,2 millones de hectáreas de bosques, más del 21% de la superficie del país, según el gubernamental Instituto Forestal (INFOR). La Región del Bío Bío es el centro de la industria, zona en que los árboles cubren más del 40% de su superficie total, seguida por las vecinas regiones de La Araucanía y El Maule, con una cobertura cercana al 20% en cada caso (Long, 2009). Cerca de 3 millones de hectáreas corresponden a plantaciones forestales donde, el pino y eucaliptus, son las dos principales especies no nativas plantadas en Chile (Long, 2009).

Las grandes industrias madereras como CMPC del grupo Matte y Forestal Arauco del grupo Angelini, utilizan estos residuos para producir biomasa con la que generan energía (PRADO, 2015). Se estima que cerca del 60% de la madera talada en el mundo se utiliza para generar energía ya sea por quema directa o como carbón vegetal, *pellets* o residuos de licor negro de las plantas de celulosa (Long, 2009), un ejemplo de esto es lo que Arauco está haciendo en siete centrales eléctricas de Chile, utilizando la mayor parte de la electricidad para alimentar sus propias instalaciones y vendiendo un superávit cercano al 30%, suficiente para entregar electricidad a una ciudad de medio millón de personas al sistema interconectado (Long, 2009). Por otra parte, existen alrededor de 120 mil pequeño y medianos propietarios (PRADO, 2015) , que no aprovechan estos residuos y quedan como desechos en el lugar de trabajo, donde son amontonados en hileras o quemados de manera “controlada”. Sin embargo, esto trae consigo grandes riesgos, ya que, la acumulación de estos desechos puede provocar incendios, plagas o enfermedades que pueden amenazar el nuevo cultivo, y la quema de éstos, producto de las altas temperaturas (400°C aproximados), tiene como consecuencia la pérdida de nutrientes del suelo lo que, puede provocar erosión.

3.1 Principales especies exóticas introducidas a Chile

En 1823 se introduce la especie *Eucalyptus globulus* desde Mendoza, en 1888 *Pinus radiata* desde California, estas especies en sus inicios tuvieron como propósito proteger al suelo contra la erosión en el territorio que iba desde la Región de O'Higgins hasta la Región del Biobío, con énfasis en la Cordillera de la Costa que estaba severamente erosionada. Siendo estas especies anteriormente mencionadas, las más comúnmente plantadas en todo el territorio chileno.

3.1.1 *Pinus radiata* D.Don (pino radiata)

Esta especie perteneciente a la familia de las pináceas es originaria de California Estados Unidos. Se desarrolla mejor en climas templados o cálidos, las mayores plantaciones están en Chile y Nueva Zelanda.

En Chile fue introducido en el año 1888 y es uno de los monocultivos con mayor superficie plantada en el país, su mayor plantación y producción se encuentra en la región de O'Higgins y el Bio Bio.

Esta especie mide aproximadamente 45 metros de altura, es una especie de crecimiento rápido, entra en la categoría de maderas blandas, su tronco puede alcanzar un diámetro de 50 cm en 20 años. Es de gran interés para la industria por la calidad de su madera y su rápido crecimiento.

Sus usos principales son para, producir papel y la fabricación de tableros de aglomerado. Se clasifica como madera liviana y blanda.

Durante el proceso de secado natural, la madera apenas se agrieta y muy escasas veces produce deformaciones, sin embargo, durante el secado artificial

Capítulo 3: Situación de la industria forestal en Chile

se observan deformaciones y torsiones en la pieza. En cuanto a la resistencia contra hongos, insectos y humedad, el Pino insigne es considerado como “no resistente”(Witte, 2004).

3.1.2 *Eucalyptus globulus* (eucalipto)

Es una de las especies de eucalipto plantadas más comúnmente en el mundo, se adecua mejor a climas mediterráneos (Long, 2009). Estos árboles pueden alcanzar hasta 60 m de altura, la madera de eucaliptus es de fibra corta, lo que la hace muy requerida en la industria de la celulosa para fabricar papeles finos.

La madera es pesada, densa y dura; es resistente al ataque de termitas debido a la resina que contiene (Tarté, 1986).

3.2 Las plantaciones forestales en Chile

El aumento de plantaciones forestales ha ido de la mano con la disminución de la superficie de bosques nativos, trayendo consigo la pérdida de biodiversidad de estos bosques.

Las plantaciones de especies exóticas disminuyen la productividad de los suelos por la erosión asociada a los sistemas de cosecha y por la demanda de nutrientes de las especies de rápido crecimiento, los que no se recuperan durante las rotaciones cortas con que son manejadas las plantaciones.

En los últimos años, la escasez de agua para consumo humano es frecuente durante los veranos, particularmente en sectores costeros y del valle entre las regiones del Maule y la Araucanía. Esto ha obligado a los Municipios a repartir agua en camiones cisterna, lo que significa un alto costo para muchas de las

Capítulo 3: Situación de la industria forestal en Chile

comunidades más pobres del país. La disminución hídrica de las cuencas por el reemplazo de arbustos o pastizales por plantaciones forestales produce la pérdida de agua por interceptación de las copas de los árboles y la evapotranspiración, además que reduce la percolación (Frene & Núñez, 2010).

Otra consecuencia que trae consigo las plantaciones forestales es la contaminación. El uso de herbicidas para preparar el suelo y pesticidas para combatir las patologías que afectan a las plantaciones. Hasta hace poco las fumigaciones se realizaban con aviones, pero en los últimos años esta práctica ha cambiado a aplicaciones directas en terreno (Frene & Núñez, 2010).

Por otra parte, si bien la industria de la papelera el rubro que presenta mayor producción es el que provoca mayor contaminación por el uso de blanqueadores en la elaboración de sus productos, estos blanqueadores son mezcla de cloro con dióxido de cloro, formando fenoles clorados por reacción con la lignina, los cuales son tóxicos y con alto poder cancerígeno. En una planta moderna, el procesamiento de la madera mediante el proceso *Kraft* requiere alrededor de 80 m³ de agua por tonelada de pulpa generada, lo que implica que deben tratarse grandes volúmenes de agua al final del proceso (Mansilla, Lizama, Gutarra, & Rodríguez) . El caso más emblemático de contaminación por el rubro es el de la planta de celulosa Valdivia del grupo ARAUCO, que generó la contaminación del río Cruces y la pérdida del Santuario de la Naturaleza Carlos Anwandter en la Región de Los Ríos (Frene & Núñez, 2010).

3.2.1 Volúmenes de residuos madereros aprovechables

El catastro a la industria forestal primaria, realizado por INFOR (instituto forestal de Chile) en el año 2016, da cuenta que la industria del aserrío es la más numerosa en unidades productivas, concentrando en el año 2015 un total de 1.090 aserraderos trabajando.

Capítulo 3: Situación de la industria forestal en Chile

En el año 2015, el consumo de trozas en la industria del aserrío fue de 17.740.467 m³ scc (metros cúbicos solidos con corteza), lo que produjo un volumen de madera aserrada de 8.372.219 m³.

Como resultado del proceso de aserrío 2015, se obtuvo un volumen de residuos madereros de 1.319.154 m³ (corteza) y de 3.525.634 m³ scc (lampazos y aserrín). Estos residuos madereros se denominan primarios dado que son producto de la primera transformación de las trozas. A este volumen se suman otros residuos madereros de elaboración o secundarios, derivados del reprocesamiento de la madera, constituidos por despuntes, viruta y aserrín, en conjunto suman 462.984 m³ ssc (Caselli & Aguirre, 2015).

Tabla 3.1: Volumen de residuos madereros generados por la industria del aserrío (Caselli & Aguirre, 2015).

Tipo de residuo	Volumen (m³)	% (*)
Corteza	1.319.154	7,4
Lampazos	767.148	4,3
Aserrín (primario)	2.758.486	15,5
Aserrín (secundario)	122.271	0,7
Despuntes	109.632	0,6
Viruta	231.081	1,3
Total	5.307.773	29,8

(*): Porcentaje del volumen total.

Capítulo 3: Situación de la industria forestal en Chile

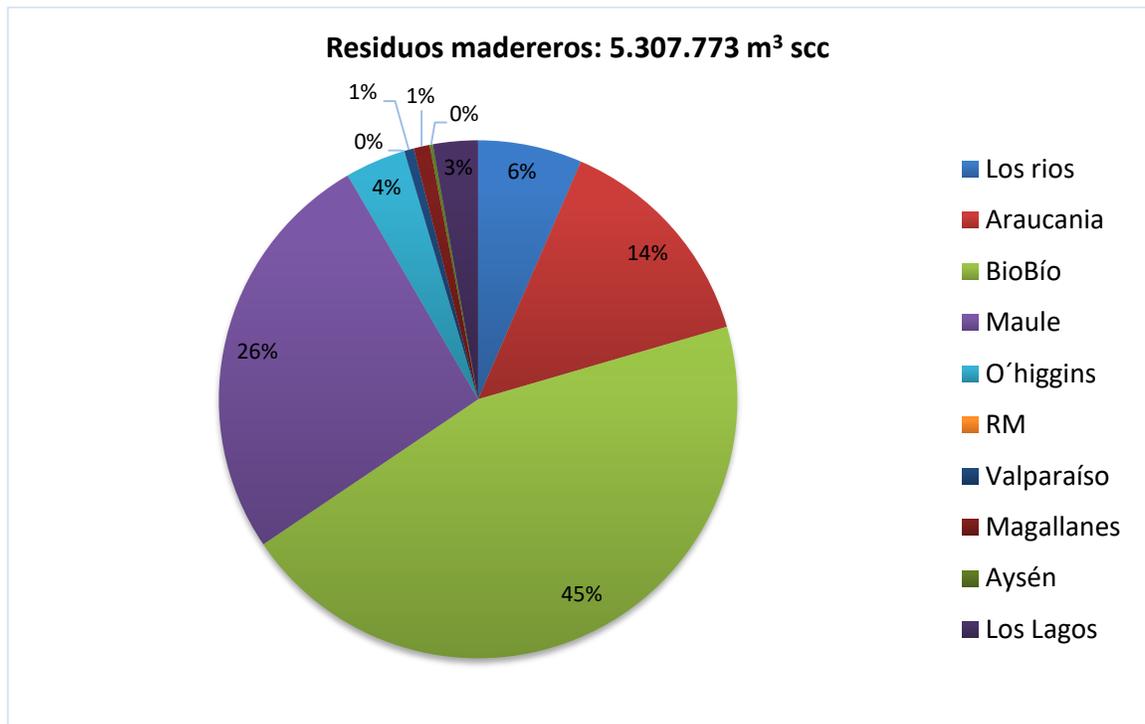


Figura 3.1: Gráfico de la distribución de residuos madereros por región (Caselli & Aguirre, 2015).

Para estimar con mayor precisión la disponibilidad de residuos madereros en el mercado, es importante saber qué se hace con ellos una vez que se han generado en el proceso del aserrío.

En el año 2015, el 66,6% de los residuos generados por los aserraderos se comercializó a distintas empresas y clientes, un 29,9% se autoconsume en las mismas industrias, sólo el 1,4% se regala (a la comunidad o a trabajadores de la empresa) y finalmente, el 2,2% del volumen de residuos se acumula para su disposición posterior o se abandona en las inmediaciones de las instalaciones, situación muy frecuente en aserraderos de tipo móvil (Caselli & Aguirre, 2015).

Capítulo 3: Situación de la industria forestal en Chile

Tabla 3.2: Destino de residuos madereros según tipo de residuo (Caselli & Aguirre, 2015).

Tipo de residuo	Comercializa	Autoconsume	Acumula	Regala
Corteza	944.418	360.048	9.070	5.618
Aserrín (prim.)	1.676.554	988.789	57.942	35.200
Lampazos	651.993	70.252	25.884	19.019
Aserrín (elab.)	79.697	37.948	1.983	2.644
Despunte	50.044	36.268	17.386	5.934
Viruta	132.331	92.348	2.333	4.070
Total (m³)	3.535.037	1.585.654	114.597	72.484

Lo anterior demuestra que si bien la cantidad de residuos de que se acumula o regala es considerablemente menor a la que se comercializa y autoconsume, esto por el aprovechamiento de estos recursos para generar energía, los residuos que no se aprovechan representan un importante volumen que podría ser utilizada para la elaboración de WPC.

CAPÍTULO 4 ADITIVOS

Un problema importante para lograr un verdadero refuerzo para los compuestos plásticos de madera es la incompatibilidad inherente entre las fibras hidrófilas y los polímeros hidrófobos, lo que resulta en una mala adhesión y, por lo tanto, en una pobre capacidad para transferir la tensión de la matriz a las fibras de refuerzo (Cui, Lee, Noruziaan, Cheung, & Tao, 2008).

Se conoce como aditivos aquellos materiales que van dispersos físicamente en una matriz polimérica, sin afectar su estructura molecular. La incorporación de aditivos a plásticos puede alterar considerablemente las propiedades del material, lo podemos clasificar en aditivos compatibilizantes y funcionales (Beltrán & Marcilla, 2012).

4.1.1 Compatibilizantes o agentes de acoplamientos

Los agentes de acoplamiento proporcionan una mejor fluidez del material compuesto fundido y por tanto promueve aumenta la compatibilidad entre las distintas fases, incluso llegando a incrementar la resistencia mecánica del mismo (Khanam & AlMaadeed, 2015). Existe una amplia variedad de agentes de acoplamiento que son utilizados en la preparación de WPC según el polímero utilizado como matriz y las propiedades finales que se pretenden obtener (Yañez, 2016).

El agente de acoplamiento se elige para formar enlaces químicos entre las cadenas de celulosa en la fibra y la matriz polimérica. Los agentes de acoplamiento más utilizados son las poliolefinas maleadas (Cui et al., 2008), los organosilanos y el politetrafluoroetileno modificado con ácido acrílico; se suele añadir una cantidad inferior al 5% en peso (Yañez, 2016). Existen una amplia

Capítulo 4: Aditivos

variedad de agentes de acoplamiento que son utilizados en la preparación de WPC según el polímero utilizado como matriz y las propiedades finales que se pretenden obtener.

4.1.2 Funcionales

Se clasifican según su función, se utiliza para mejorar algunas propiedades. En la tabla siguiente se muestran algunos tipos de aditivos funcionales

Tabla 4.1: Clasificación de aditivos según su función (elaboración propia).

Función del aditivo	Tipo de aditivo
Aditivos que facilitan el procesado	Estabilizantes Lubricantes
Aditivos que modifican las propiedades mecánicas	Plastificantes Cargas reforzantes Modificadores de impacto
Aditivos que disminuyen costes de las formulaciones	Cargas Diluyentes y extendedores
Modificadores de propiedades superficiales	Agentes antiestáticos Aditivos antideslizamiento Aditivo antidesgaste Promotores de adhesión
Modificadores de propiedades ópticas	Pigmentos y colorantes
Aditivos contra el envejecimiento	Estabilizantes contra la luz UV Fungicidas
Otros	Agentes espumantes Retardantes de llama

CAPÍTULO 5 DESARROLLO DE MATERIALES EN BASE A WPC

5.1 Formulación

Para la preparación de WPC, se utilizan varios termoplásticos como matrices, tales como polietileno, polipropileno, poliestireno y cloruro de polivinilo. El tamaño y el contenido de las partículas de madera tienen una fuerte influencia en las propiedades mecánicas del compuesto, además el contenido de humedad de las fibras de madera debe ser inferior al 2%.

Ratanawilai & Taneerat, (2018), realizaron estudios de las propiedades de los WPC a la intemperie por 90 días. Utilizaron cinco tipos de plástico como matriz polimérica, polietileno de baja y alta densidad (HDPE y LDPE), polipropileno (PP), cloruro de polivinilo (PVC), y poliestireno (PS). Como relleno se utilizó harina de madera de caucho. Además, utilizaron anhídrido maleico, estabilizador de UV y cera de parafina como agente de acoplamiento, estabilizador ultravioleta y lubricante, respectivamente. Los WPC se obtuvieron por moldeo por compresión.

Para la formulación de WPC se utilizaron porcentajes de los polímeros en 40,50 y 60% en peso y de madera 35.8, 45.8 y 55.8% en peso.

Los porcentajes de agente acoplamiento MA, UV y lubricante se fijaron en, 3%, 0.2% y 1% respectivamente.

Los resultados obtenidos en este estudio arrojaron que el PS y el PP, exhibieron las mejores propiedades de flexión y tracción, mientras que LDPE y PVC tenían propiedades mecánicas significativamente más bajas que los otros WPC, especialmente el LDPE dio todas las propiedades mecánicas observadas más pobres. Además, el PS y el PP con 60% en peso de plástico, perdieron menos

Capítulo 5: Desarrollo de materiales en base a WPC

propiedades de tracción y flexión que los otros compuestos. Las mayores pérdidas se produjeron para LDPE con 40% de masa en plástico.

En aplicaciones al aire libre, los WPC están expuestos a la intemperie debido a la lluvia y la luz solar ultravioleta, lo que degrada las propiedades físicas y mecánicas de los WPC. Los factores que contribuyen incluyen el cambio de cristalinidad en la fase de la matriz, la oxidación de las superficies de WPC y la degradación interfacial causada por la absorción de humedad y la radiación ultravioleta (Ratanawilai & Taneerat, 2018).

Los WPC con un 40% en peso de contenido de plástico degradan sus propiedades físicas y mecánicas después de la intemperie, en contraste, al aumentar este porcentaje a más de un 50% los WPC poseen una mejor resistencia a la intemperie (Ratanawilai & Taneerat, 2018).

Con altos contenidos de plástico, la harina de madera puede ser completamente encapsulada por la matriz plástica lo que ayuda a dispersar las partículas de madera en la matriz. Una buena dispersión mejora la distribución del estrés y, por lo tanto, aumenta la resistencia a la flexión (Ratanawilai & Taneerat, 2018).

Solís & Lisperguer, (2005), estudiaron el efecto de harina de madera de dos especies, una con *Nothofagus alpina* (Raulí) y otra con *Pinus radiata* D. don (Pino radiata) sobre las propiedades mecánicas de materiales compuestos madera plástico, cuando se incorporan porcentajes del 10 y 20% de matriz polimérica. Los termoplásticos usados fueron polietileno de alta densidad (HDPE) y polipropileno (PP). Las mezclas se realizaron por extrusión.

Los resultados arrojaron que la resistencia al impacto de HDPE y PP con madera de Pino radiata, producen una disminución significativa al incorporar harina de madera cuando el reemplazo es del 10% y esta disminución aumento más aun Con compuestos de 20%. a resistencia a la tracción se vio aumentada con respecto a los polímeros puros con porcentajes de 10% de madera. Con 20% se

Capítulo 5: Desarrollo de materiales en base a WPC

obtuvo una pequeña disminución llegando casi a los valores de los termoplásticos puros.

Para la madera con raulí, la resistencia al impacto también se ve disminuida, pero en porcentajes menores que con Pino y la resistencia a la tracción también se vio aumentada en el caso de 10% de madera y con 20% ocurre una disminución que no representa valores significativos respecto a los polímeros puros.

La disminución de la resistencia al impacto se ve afectada por la distribución de la harina de madera en la matriz polimérica ya que esta disminuye el grado de cristalinidad, lo cual dificulta la disipación de energía necesaria para mantener la resistencia al impacto. Por otra parte la resistencia a la tracción se ve aumentada en porcentajes de 10% de madera ya que, la distribución del relleno en la matriz produce un aumento de la viscoelasticidad del material, lo cual determina un aumento de la resistencia a la tracción, aunque el aumento no es muy significativo, esto se puede deber a la falta de agente de acoplamiento.

Otros autores han trabajado con agentes espumantes en su proceso con el fin de reducir la densidad del material y los costos de producción. (Moreno, Rodrigue, Yann, Ballerini, & Gacitúa, 2013), trabajaron con HDPE reciclado como matriz y con fibra de madera de *Pinus radiata* D. Don (Pino radiata) como refuerzo; las concentraciones de fibra fueron 15 y 25% en peso, el polímero se espumó con agente químico ACA (Azodicarbonamida) en concentración de 4% del peso del compuesto y se utilizó anhídrido maleico MAPE (Epolene E-20) en 5% del peso como agente de acoplamiento. El compuesto se obtuvo por proceso de extrusión. Los resultados mostraron que el agente de acoplamiento mejoró la adherencia del polímero y la fibra de madera; mientras que el agente espumante (aditivo), disminuyó la densidad del compuesto. Por otra parte, las propiedades mecánicas de dureza, impacto, flexión y tracción fueron superiores en los compuestos espumados que los sin espumar.

Capítulo 5: Desarrollo de materiales en base a WPC

En la siguiente tabla se resumen las concentraciones de los 3 estudios citados.

Tabla 5.1: Resumen de las concentraciones óptimas.

Autor	Año publicacion	Polimero	% polimero	% madera	Compatibilizante	Aditivos (*)
Ratanawilai & Taneerat	2018	PP, PE, PVC, PS	40,50, 60	35.8, 45.8, 55.8	Si	Si
Solís & Lispergue	2005	HDPE, PP	10, 20	0 al 90	No	No
Moreno et al.	2013	HDPE	(**)	15, 25	Si	No

Nota: Moreno et al., 2013, utilizaron agente espumante en concentraciones del 4% del peso del WPC.

(*): Los aditivos usados fueron, estabilizador contra UV y lubricante.

(**): Las concentraciones varían según el uso de compatibilizantes y agente espumante

5.2 Procesamiento WPC

El proceso se inicia con la preparación de los materiales; los productos plásticos reciclados se separan, se limpian, se secan y luego se reduce su tamaño para poder ser procesado, por su parte la madera se tamiza para quedar en tamaños inferiores a 5 mm, luego se secan hasta quedar con una humedad inferior al 2%.

Los compuestos de madera plástico se procesan mediante varias técnicas, siendo las más comunes, la extrusión, moldeo por inyección y moldeo por compresión (Khanam & AlMaadeed, 2015).

5.2.1 Extrusión

Forma elementos termoplásticos con una sección transversal uniforme, como tubos, mangueras y cables. En la parte de fusión, los gránulos sólidos se transportan desde la tolva y se convierten en polímero fundido. En la sección de compresión, el polímero fundido se compacta y se mezcla con el aditivo (si es necesario). La sección de medición es necesaria para producir la sección transversal del producto deseado. La extrusora de doble tornillo y la extrusora de tornillo simple son tipos básicos de extrusoras. Los gránulos de polímeros con fibra / relleno se alimentan desde la tolva al tornillo y luego se empujan a lo largo de la cámara del barril para calentarse.

5.2.2 Moldeo por inyección

El compuesto se precalienta en una cámara cilíndrica a una temperatura a la que puede fluir y luego se forman en una cavidad fría y cerrada del molde por medio de una presión bastante alta, que se aplica hidráulicamente a través del tipo de pistón o tornillo. El tornillo gira para recoger el polímero y fundirlo, mezclar el material fundido y entregarlo al molde cerrado. El tornillo se mueve hacia adelante para forzar un volumen fijo de polímero fundido en el molde cerrado. Después de fundirse, el polímero se solidifica en el molde frío, el tornillo gira y se mueve hacia atrás para cargar el polímero para el siguiente ciclo.

5.2.3 Moldeo por compresión

Esta técnica de procesamiento contiene moldes fijos y móviles. El compuesto se coloca entre ambos y luego se cierra el molde, se aplica calor y presión para obtener un compuesto homogéneo. La presión y el calor aplicados dependen de

Capítulo 5: Desarrollo de materiales en base a WPC

las propiedades térmicas y reológicas del polímero. Finalmente se aplica enfriamiento lento o rápido luego del tiempo de mantenimiento.

5.3 Propiedades de los WPC

Las propiedades de los WPC dependen de su composición y la forma de prepararlos. Algunas propiedades físicas y mecánicas esperadas se detallan a continuación.

5.3.1 Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas de un material se definen como la capacidad de resistir cargas o fuerzas externas aplicadas sobre este.

La resistencia a la flexión se define como la capacidad de los materiales para resistir la deformación bajo cargas, se utiliza para medir la rigidez del compuesto. (Ratanawilai & Taneerat, 2018). El módulo de flexión o módulo de elasticidad en ensayos de flexión, mide la resistencia de un material al ser sometido a una fuerza que incide en su deformación o curvatura (López & Rojas, 2018).

Otra de las propiedades mecánicas estudiadas para materiales compuestos es la resistencia a la tracción, en la cual el material es sometido a esfuerzos de tensión que mide la resistencia a la rotura. El módulo de tracción o módulo de elasticidad en ensayos de tracción, es la medida de resistencia de un material al ser sometido a esfuerzos de tensión que inciden en su deformación (López & Rojas, 2018).

La resistencia al impacto es la propiedad mediante la cual es medida la tenacidad de un material. Dicha propiedad se determina mediante ensayos de impacto y se

Capítulo 5: Desarrollo de materiales en base a WPC

define como la capacidad de absorción de energía en la zona plástica de un material, antes de alcanzar la fractura súbita., mide la resistencia de un material al ser sometido a una fuerza que incide en su deformación o curvatura Flexión, tracción, impacto y compresión (López & Rojas, 2018).

La resistencia a la compresión es otra de las propiedades útiles para caracterizar el material compuesto. Esta permite tener un conocimiento de la carga axial que un material puede soportar en un pequeño segmento del mismo (López & Rojas, 2018).

5.3.2 Propiedades físicas

La densidad, dureza, absorción de humedad y porcentaje de hinchamiento son utilizados en la caracterización física del WPC.

La densidad es una de las propiedades físicas con mayor relevancia, la cual se define como la cantidad de masa por unidad de volumen. Para el caso de los WPC, la densidad tiene directa relación con las propiedades mecánicas del mismo, puesto que cuanto más denso, el material se hace más fuerte y duro.

Dependiendo del tipo de madera y la matriz polimérica a utilizar, así como la proporción de materiales y el uso de agente de acoplantes, se obtiene un material más o menos poroso y con cierta cantidad de vacíos de aire internos (López & Rojas, 2018).

Otra propiedad importante de los WPC es la dureza, que se define como la dificultad que opone un material a ser penetrado por otros cuerpos (López & Rojas, 2018), en otras palabras es la propiedad de un material que permite que éste resista una deformación dada (Yañez, 2016). La dureza es una condición de

Capítulo 5: Desarrollo de materiales en base a WPC

la superficie del material, que depende del porcentaje de fibra presente en el compuesto.

La absorción de agua es otra de las propiedades para caracterizar físicamente los WPC. Cuando el contenido de madera es mayor, la absorción de agua aumenta (Moya Villablanca, Poblete Wilson, & Valenzuela Hurtado, 2012). Del mismo modo, los porcentajes de absorción de agua disminuyen con el aumento de porcentaje de polímeros. La absorción de agua genera cambios en la forma del producto, así como la pérdida de resistencia en el mismo (López & Rojas, 2018).

El porcentaje de hinchazón volumétrico expuesto a distintas condiciones de humedad y temperatura es un factor importante en los WPC, donde los poros de la madera están rellenos con polímeros, reduciendo la posibilidad que entre agua. Las pruebas para medir su estabilidad dimensional se centran en, la eficiencia anti-encogimiento (ASE, *antishrink efficiency*), que es la reducción porcentual de la hinchazón de la madera tratada con respecto a la madera sin tratar bajo saturación de humedad y en la eficiencia de exclusión de humedad (MEE, *moisture exclusion efficiency*) que se define como la habilidad de la madera de excluir la humedad y está relacionado con la velocidad con que el material compuesto absorbe el agua y se hincha, sin llegar al punto máximo de hinchazón o de humedad absorbida (Yañez, 2016).

5.4 Caracterización del material compuesto

Las siguientes técnicas de caracterización se tratarán en esta revisión: propiedades mecánicas, propiedades térmicas, propiedades morfológicas y propiedades reológicas del material compuesto.

5.4.1 Mecánica

Las técnicas de caracterización mecánica del compuesto WPC son, flexión, tensión, impacto y dureza. Todas estas pruebas deben realizarse bajo estándares internacionales como la *American Society of Testing Materials* (Asociación Americana de Ensayo de Materiales; ASTM según sus iniciales en inglés) (Khanam & AlMaadeed, 2015).

Flexión: Las propiedades de flexión de WPC se determinan de acuerdo a la norma ASTM D790-92 con una máquina de prueba universal (Ratanawilai & Taneerat, 2018) (ver Fig. 5.1(a)).

La resistencia a la flexión de cualquier material compuesto se determina mediante la siguiente ecuación

$$\sigma = \frac{3FL^2}{2bt^2}$$

Donde:

F, es la carga máxima (en newton)

L, es la distancia entre los soportes (en milímetros)

b, es el ancho de la muestra (en milímetros)

t, es el espesor (en milímetros)

El módulo de flexión se calcula utilizando la siguiente formula

Capítulo 5: Desarrollo de materiales en base a WPC

$$E = \frac{FL^3}{4bt^3d}$$

Donde:

F, es la carga máxima (en newton)

L, es la distancia entre los soportes (en mm)

b, es el ancho de la probeta

t, es el espesor de la muestra y

d, es la desviación (en mm) correspondiente a la carga F

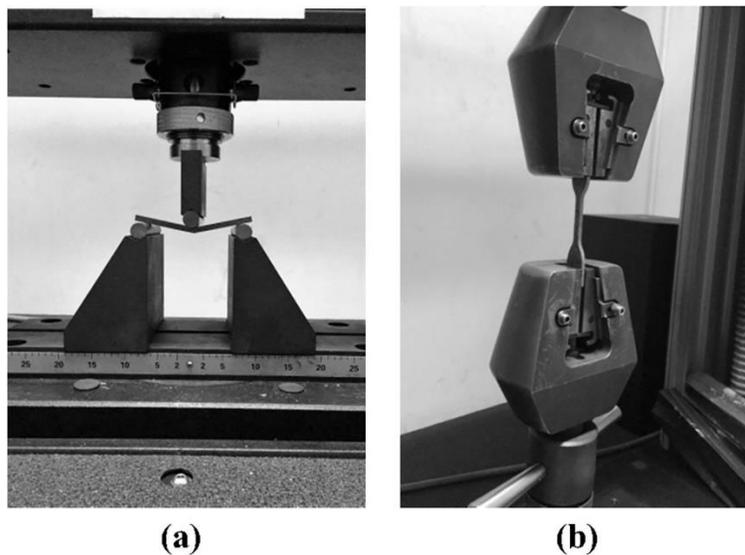


Figura 5.1: Imagen de ensayos mecánicos de una muestra de compuestos madera y plástico ; (a) prueba de flexión y (b) prueba de tracción (Ratanawilai & Taneerat, 2018).

Tracción: Se aplican pruebas de tracción para observar la resistencia de los compuestos madera plástico mediante una máquina de prueba universal de acuerdo con la norma ASTM D638-99 como se muestra en la Fig. 5.1(b) (Ratanawilai & Taneerat, 2018) . La muestra se puede deformar al aumentar la

Capítulo 5: Desarrollo de materiales en base a WPC

carga de tracción, que se aplica a lo largo del eje largo del material a una velocidad constante (Khanam & AlMaadeed, 2015).

La siguiente formula se utiliza para medir el esfuerzo (σ):

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Donde, F es la fuerza aplicada y A es el área de la sección transversal.

La tensión se define de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

Donde, ΔL es el cambio en la longitud de la muestra y L_0 es la longitud inicial de la muestra.



Figura 5.2: Muestra de fractura extensible de WPC con LDPE como matriz (Khanam & AlMaadeed, 2015).

Capítulo 5: Desarrollo de materiales en base a WPC

Los factores más importantes para mejorar las propiedades mecánicas son una buena adhesión entre las faces (polímero-madera) y una buena dispersión de las fibras o polvo de madera dentro de la matriz.

Ratanawilai & Taneerat (2018), investigo las propiedades de flexión de 5 tipos de plásticos (HDPE, LDPE, PP, PVC y PS) en diferentes proporciones (40%-50%-60%) determinó que el tipo de plástico afecta significativamente la resistencia a la flexión del WPC. Al comparar los tipos de plásticos se encontró que los WPC con PP alcanzaron la mayor resistencia a la flexión mientras que con LDPE se alcanzó el valor más bajo, esto porque el PP puro posee grupos metilo unidos a átomos de carbono en la cadena que le atribuye propiedades mecánicas superiores. Además, los WPC con un 40% y 60% en peso poseen una resistencia a la flexión significativamente menor que aquellos con 50% en peso.

Pruebas de intemperie natural: Las pruebas de intemperie se debe llevar a cabo de acuerdo con la norma ASTM D1435-99 durante 13 semanas (2160h), mediante la exposición directa de WPC a la intemperie natural (Fig. 5.3).



Figura 5.3: Imagen de WPC a la intemperie natural (Ratanawilai & Taneerat, 2018).

Capítulo 5: Desarrollo de materiales en base a WPC

Pruebas de impacto: Para medir la resistencia al impacto, se utiliza el ensayo destructivo dinámico de Izod, el cual incorpora el péndulo de Charpy (nombre por su creador Georges Charpy) en los que se hace impactar un péndulo a la probeta midiendo la energía de impacto necesaria para la fractura inicie. Para WPC con alta tenacidad (es decir, baja fragilidad) se preparan normalmente adicionando una mezcla de MMA (metil metacrilato) y un isocianato con una funcionalidad acrílica, lo que permite al material aumentar la resistencia al impacto y a la flexión hasta en un 100% (Yañez, 2016).

Pruebas de dureza: Si bien existen una gran variedad de procedimientos el método más clásico es la indentación estática, que consiste en penetrar una muestra con una herramienta dura y de geometría conocida durante una determinada distancia. De este modo la dureza de una muestra está definida como la fuerza necesaria para penetrar una determinada profundidad en la muestra (Yañez, 2016).

5.4.2 Térmica

Las propiedades térmicas del compuesto son importantes para seleccionar las condiciones de procesamiento y el campo de aplicación (Khanam & AlMaadeed, 2015).

Métodos de caracterización de calorimetría diferencial de barrido (DSC) y análisis termogravimétrico (TGA) describen las propiedades térmicas de los WPC.

Calorimetría diferencial de barrido (DSC): Es una técnica de análisis térmico empleada en la medida de temperaturas y flujos de calor asociados con transiciones de fases de la materia como cristalización y de fusión, o con reacciones químicas como oxidación, medidos en función del tiempo y la temperatura (Márquez & Maza, 2003).

Capítulo 5: Desarrollo de materiales en base a WPC

En la técnica de calorimetría diferencial de barrido se utilizan dos muestras, una de trabajo (muestra de WPC) y una de referencia, a cada se le suministra calor, generalmente a 10° C por minuto con una velocidad constante para ambas muestras. Lo que hace la DSC, es medir cuanto calor adicional se le debe suministrar a la muestra de trabajo en comparación con la muestra de referencia (Khanam & AlMaadeed, 2015).

El porcentaje de cristalinidad ($X_c\%$) de una muestra se calcula con la siguiente formula:

$$X_c\% = \frac{\Delta H_f / W\%}{\Delta H_0} \times 100$$

Donde:

ΔH : es el calor de fusión del polímero en el compuesto, determinado a través del termograma de DSC,

ΔH_0 : es el calor de fusión del polímero cristalino 100% y

W%: es el porcentaje en peso del polímero en el material compuesto.

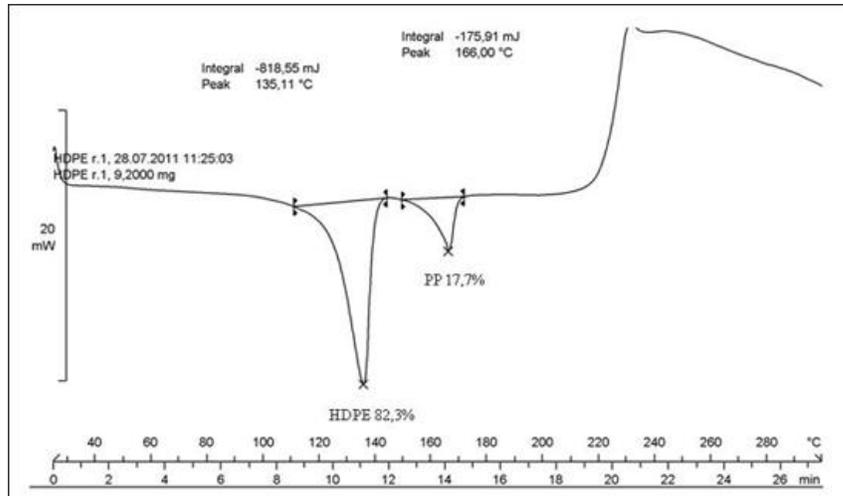


Figura 5.4: Grafico de DSC de mezcla de polímeros reciclados (Moreno et al., 2013).

Análisis termogravimétrico (TGA): Esta técnica registra los cambios de masa en función de la temperatura o el tiempo del compuesto asociado con las transiciones o procesos de degradación.

Los polímeros se degradan a diferentes temperaturas, por ejemplo, el PP se degrada a temperaturas inferiores que el PE debido a la sustitución del grupo metilo. Los rellenos aumentan la estabilidad térmica de los compuestos (Khanam & AlMaadeed, 2015).

5.4.3 Estructural (química)

La espectroscopia infrarroja de transformada de Fourier (FTIR) es un método para la identificación cualitativa y cuantitativa de grupos funcionales orgánicos.

La espectroscopia molecular se basa en la interacción entre la radiación electromagnética y las moléculas. Dependiendo de la región del espectro en la que se trabaje y por tanto de la energía de la radiación utilizada (caracterizada

por su longitud o número de onda), esta interacción será de diferentes naturalezas: excitación de electrones, vibraciones moleculares y rotaciones moleculares. La molécula, al absorber la radiación infrarroja, cambia su estado de energía vibracional y rotacional.

5.4.4 Morfológica

Para analizar la microestructura del compuesto se utiliza el microscopio electrónico de barrido (SEM), el cual produce imágenes de alta resolución de la superficie de la muestra utilizando la interacción electrón-materia. Este instrumento permite la observación y caracterización de la superficie de la muestra en estudio. Utiliza un haz de electrones en vez de un haz de luz para formar una imagen.

El microscopio electrónico de barrido está equipado con diversos detectores, entre los que se pueden mencionar: el detector de electrones secundarios para obtener imágenes de alta resolución SEI (Secondary Electron Image), un detector de electrones retrodispersados que permite la obtención de imágenes de composición y topografía de la superficie BEI (Backscattered Electron Image), y un detector de energía dispersiva EDS (Energy Dispersive Spectrometer) permite coleccionar los Rayos X generados por la muestra y realizar diversos análisis semicuantitativo y de distribución de elementos en superficies (Cimav, s. f.).

En la figura 5.5, se puede observar que el compuesto sin agente de acoplamiento presenta mayor cantidad de espacios vacíos en comparación con la figura 5.6, el cual posee mejor interacción refuerzo-matriz, donde se reduce la cantidad de fibras extruidas o fracturadas. Existe una mejor encapsulación de la fibra al incorporar MAPE (polietileno maleado) como agente de acoplamiento

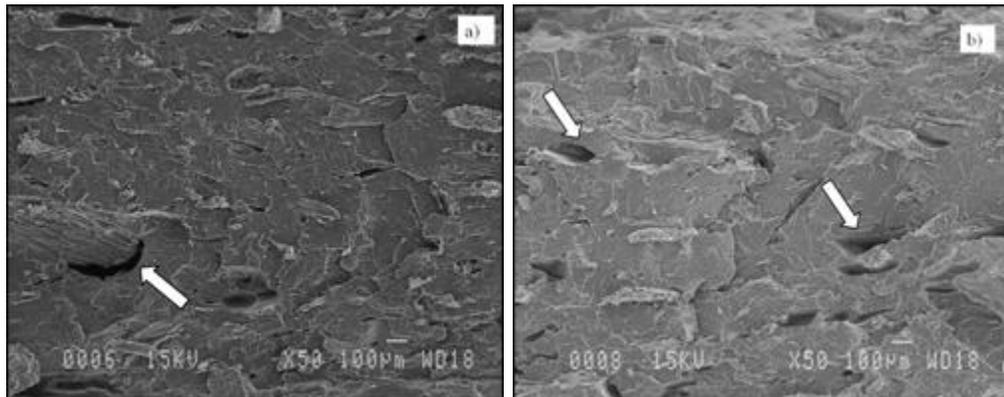


Figura 5.5: muestra de WPC con 15% de fibra de madera sin agente acoplante.

a) sentido transversal y b) sentido longitudinal (Moreno et al., 2013).

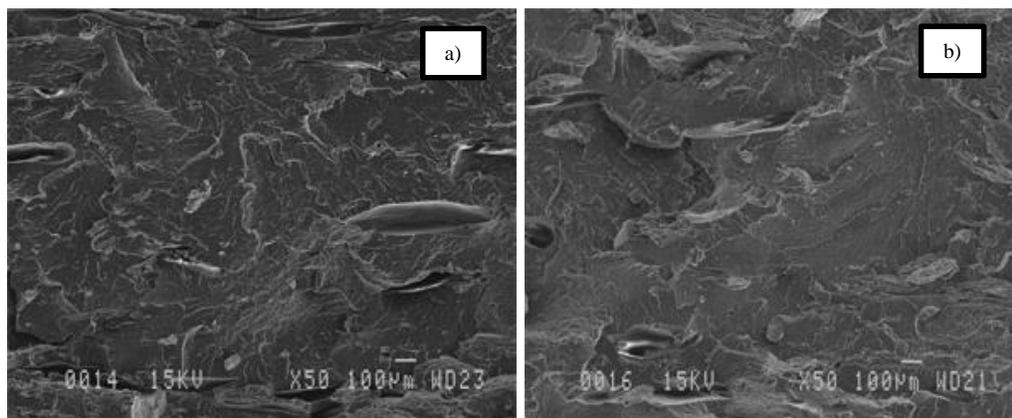


Figura 5.6: muestra de WPC con 15% de fibras de madera y 5% de agente acoplante

MAPE. a) Sentido longitudinal y b) sentido transversal (Moreno et al., 2013).

5.4.5 Reológica

La reología es la ciencia del flujo que estudia la deformación de un cuerpo sometido a esfuerzos externos (Hildegard Fulcanelli, s. f.). El comportamiento

Capítulo 5: Desarrollo de materiales en base a WPC

reológico se relaciona con el flujo viscoso, la elasticidad del material, la viscoelasticidad y la elasticidad de Hooken.

Existen varios parámetros que afectan las propiedades viscoelásticas de los polímeros como, la temperatura, la presión y el tiempo. Sin embargo al agregar refuerzo a la matriz polimérica surgen otros cambios en las propiedades reológicas producto de las propiedades del refuerzo como la forma, el porcentaje de peso, el tamaño y las propiedades de adhesión (Khanam & AlMaadeed, 2015).

Reómetro capilar: En este tipo de viscosímetros un fluido es obligado a pasar a través de un tubo observándose una distribución de velocidades en el tubo de tipo parabólico, de forma que la porción del fluido que está en contacto con la pared del capilar tiene una velocidad nula y la porción del fluido que se encuentra en el centro del tubo tiene una velocidad máxima.

La siguiente ecuación de Hagen-Poiseuille mide la viscosidad

$$\eta = \frac{\pi r^4 \Delta P t}{8 V L}$$

Donde:

η : es la viscosidad del fluido,

ΔP : es la caída de presión a lo largo del capilar,

r : es el radio del capilar,

L : la longitud del capilar y

V : el volumen del fluido que ha circulado en un tiempo t .

5.5 Humectabilidad

Las fibras de madera absorben la humedad y se hinchan, destruyendo la interacción interfacial e induciendo grietas en los compuestos.

Para el cálculo de absorción de agua (WA) e hinchamiento del espesor (TS) se utiliza la siguiente ecuación:

$$WA(\%) = \left(\frac{m_t - m_0}{m_0} \right) \times 100$$

$$TS(\%) = \left(\frac{t_t - t_0}{t_0} \right) \times 100$$

Donde, m_0 y m_t son la masa de la muestra antes y después de la inmersión, t_t y t_0 son el espesor de la muestra antes y después de la inmersión.

La humedad absorbida degrada la interacción interfacial en el compuesto, reduciendo la transferencia de tensión y, por lo tanto, disminuyendo las propiedades mecánicas. Además, la presencia de agua hace que las partículas de madera se hinchen y causen estrés en la matriz formando microcracking, las que contribuyen a una mayor entrada de agua al compuesto. El efecto del agua es a menudo

irreversible, y las propiedades de los materiales no se recuperan después del secado (Turku, Kärki, & Puurtinen, 2018).

Compuesto madera plástico es un material cuyas ventajas provienen de las características de los materiales que componen el compuesto, aunque posee características universales similares como, apariencia similar a la madera, son de mantenimiento sencillo, no necesita barnizado, ni tintado, presentan mayor resistencia (por la flexibilidad que le otorga los polímeros termoplásticos) y

Capítulo 5: Desarrollo de materiales en base a WPC

durabilidad, absorbe menos humedad, se puede construir en multitud de formatos y colores, no es atacado por termitas, hongos u otras plagas, no se astilla ni agrieta como la madera común, es de instalación sencilla, el material requiere un escaso consumo energético, es un material eco-amigable ya que, utiliza residuos para su elaboración.

CAPÍTULO 6 Impacto ambiental, social y económico

Muchos procesos productivos poseen un alto nivel de aspecto e impacto ambiental. Para minimizar estos atenuantes se han desarrollado políticas ambientales con el fin de caracterizar los controles ambientales de las empresas.

La educación ambiental que está dirigida a esta nueva sociedad tiene como contexto el tener una calidad de vida de manera más integral, donde el vínculo con el medio ambiente es fundamental para el desarrollo social.

6.1 La industria del plástico

El plástico se encuentra en todas partes. Su bajo costo y fácil manejo ha generado un auge en la producción de objetos con este material (Sierra, 2018).

El problema ocurre porque gran parte de estos plásticos son fabricados para ser desechados luego de un solo uso. Las bolsas tardan alrededor de 1 minuto en ser fabricadas y el 97% termina en vertederos, rellenos sanitarios y en el océano (MMA, 2018a).

La industria del plástico a la fecha ha generado más de 8 mil millones de toneladas, generando un impacto negativo en el medio ambiente. Alrededor de 13 millones de toneladas de plástico son vertidas cada año a los océanos. En la actualidad hay 600 especies marinas afectadas por estos desechos, que originan pérdidas en sectores como la pesca o el turismo. Además, con el paso del tiempo los plásticos se dividen en fragmentos más pequeños llamados microplásticos (categorización actual < 5 mm) que al ser consumidos por animales marinos

(Fig.6.1) pueden entrar en la cadena alimenticia humana (ONU, 2018a) (Setälä, Norkko, & Lehtiniemi, 2016).

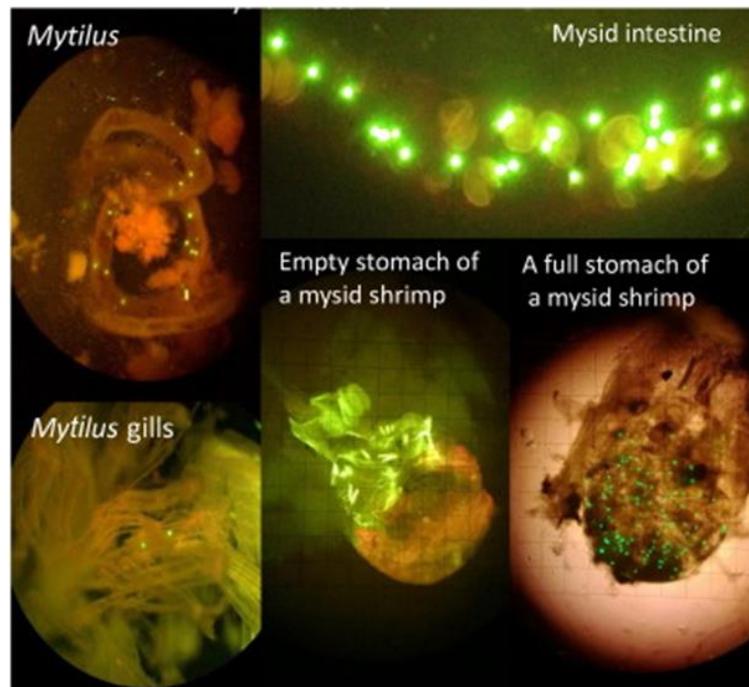


Figura 6.1: Imágenes microscópicas de microesferas microplásticas ingeridas por especies marinas (Setälä et al., 2016).

Los microplásticos se encuentran en todo el mundo en ambientes marinos donde se han estado acumulando durante varias décadas. Los microplásticos son motivo de preocupación, especialmente debido a su durabilidad y larga vida útil. El daño de los microplásticos ingeridos puede ser, obstrucción del tracto digestivo, adherirse a las superficies externas que impiden la movilidad, etc.

El 80% de las aves tiene algún tipo de microplástico en el estómago y se espera que para el 2050 el 99% de las aves marinas habrán ingerido plástico al menos en una oportunidad (MMA, 2018a) .

Capítulo 6: Impacto ambiental, social y económico

Plásticos como el PVC que contienen cloro en sus cadenas moleculares, pueden liberar químicos dañinos al suelo, los que luego se pueden filtrar hacia aguas subterráneas u otras fuentes de agua (Poonam; et al., s. f.).

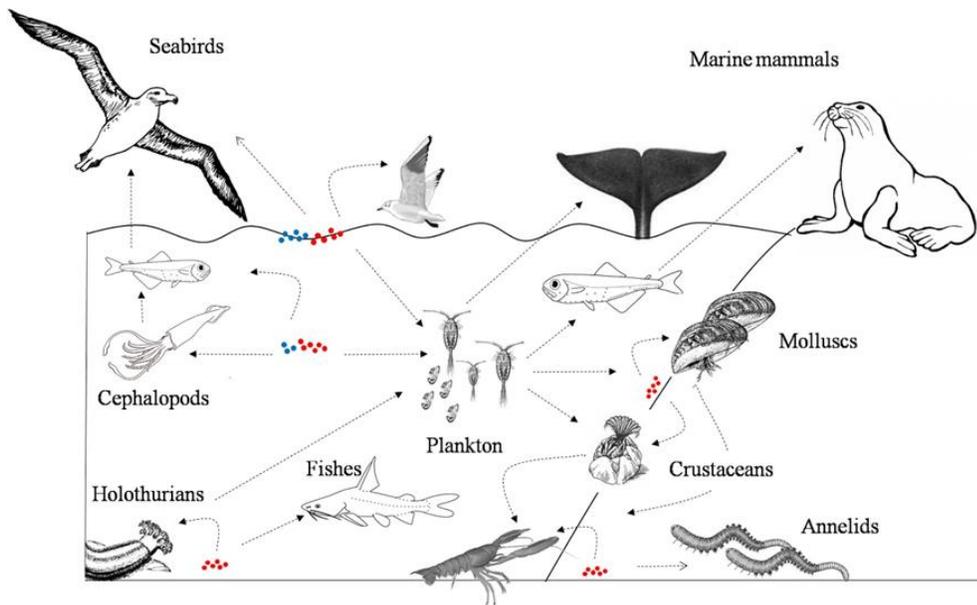


Figura 6.2: Un modelo conceptual de las rutas tróficas potenciales de los microplásticos a través de vertebrados marinos e invertebrados. (Ivar do Sul & Costa, 2014).

La red trófica mostrada en la Fig.6.2, muestra el consumo de microplásticos de animales marinos, los puntos azules son polímeros que son menos densos que el agua de mar (es decir, PE y PP) y los puntos rojos son polímeros que son más densos que el agua de mar (es decir, PVC). Las flechas representan la hipotética transferencia microplástica (Ivar do Sul & Costa, 2014).

En América Latina varias naciones han comenzado a regular la utilización del plástico a través de leyes. Chile, Colombia y Costa Rica cuentan con normas

Capítulo 6: Impacto ambiental, social y económico

nacionales que regulan el uso de plásticos desechables, mientras que otros países como Perú están aún en proceso de regulación (Sierra, 2018).

6.1.1 Cifras del problema en Chile

3400 millones de bolsas son utilizadas al año y estas tardan en promedio 500 años en degradarse, anualmente 200 bolsas son utilizadas por persona.

Chile anuncio una ley que prohíbe el uso de bolsas plásticas de un solo uso en todo el territorio nacional, el incumpliendo de esta ley, trae consigo sanciones de hasta 5 unidades tributarias mensuales (UTM) por cada bolsa plástica entregada en el comercio (AMBIENTE, 2018).

Según la encuesta nacional del medio ambiente 2018, el 95% de las personas está de acuerdo en prohibir las bolsas plásticas, lo que indica que la sociedad está cada vez más preocupada de mantener una relación más amigable con el medio ambiente.

6.2 Economía y residuos

La producción de residuos sólidos es característica de todas las actividades sociales y productivas, lo que implica contar con un sistema de recolección y transporte de éstos hacia sitios de disposición final.

El reciclaje es un plan de manejo de residuos, que tiene como fin contribuir a la protección del medio ambiente, ya que permite la recuperación de materiales para reincorporarlos al proceso productivo contribuyendo, además, con el desarrollo económico de los países.

Capítulo 6: Impacto ambiental, social y económico

El manejo de residuos se refiere a todas las acciones operativas a las que se somete el residuo incluyendo recolección, almacenamiento, transporte, pre-tratamiento y tratamiento (SINIA, 2018). El éxito y reutilización de residuos se relaciona con la educación ciudadana (Rivera, 2017).

Mundialmente se genera más de 4 billones de toneladas de residuos sólidos cada año, de los cuales, la mitad son residuos sólidos urbanos (RSU) (Rivera, 2017).

Alemania es líder en reciclaje, donde alrededor de 70% de los residuos del país son recuperados y reutilizado cada año. El alto porcentaje se debe a la estrategia de gestión que involucra a todos los actores como el gobierno, la industria y los ciudadanos.

En Chile se producen alrededor de 7 millones de toneladas de residuos domiciliarios al año y se reciclan menos del 10% de ellos.

La creación de nuevas leyes como la ley Responsabilidad Extendida al Productor (REP) promulgada en el 2016, obliga tanto a los productores como a los fabricantes a hacerse cargo de sus residuos, impulsando estrategias y procesos para la recuperación de estos, fomentando los niveles de reciclaje. La norma establece que todos los productores o importadores de “productos prioritarios” deben hacerse cargo de los bienes una vez terminada su vida útil. Su objetivo es crear una cadena virtuosa, donde estén involucrados todos los actores del ciclo de vida de un producto. Los fabricantes deben evitar la generación de desechos, recuperar elementos de valor desde los residuos y eliminar de manera ambientalmente compatible aquellos residuos que no se pueden reciclar. Seis son los productos prioritarios (aceites lubricantes, aparatos eléctricos y electrónicos, baterías, pilas, envases, embalajes y neumáticos) y se consideran como tal por su consumo masivo, su volumen significativo y su peligrosidad (tres de ellos se consideran peligrosos) (MMA, 2018b).

6.2.1 Economía Circular

Es un modelo económico que apunta a fomentar el desarrollo sostenible, aumentar la competitividad global y generar nuevos empleos. El objetivo es mantener los materiales en uso el mayor tiempo posible. Este tipo de economía se centra en la base de reducir, reutilizar y reciclar.

El desarrollo sostenible, tiene como definición, satisfacer las necesidades del presente, sin comprometer las capacidades de las futuras generaciones para satisfacer sus propias necesidades (Ashby, 2013).

El principal desafío que tiene este modelo económico, es repensar cómo maximizar el valor de los productos y materiales, y de esta manera contribuir a reducir el uso de los recursos naturales, creando un impacto social y ambiental positivo (Antikainen & Valkokari, 2016).

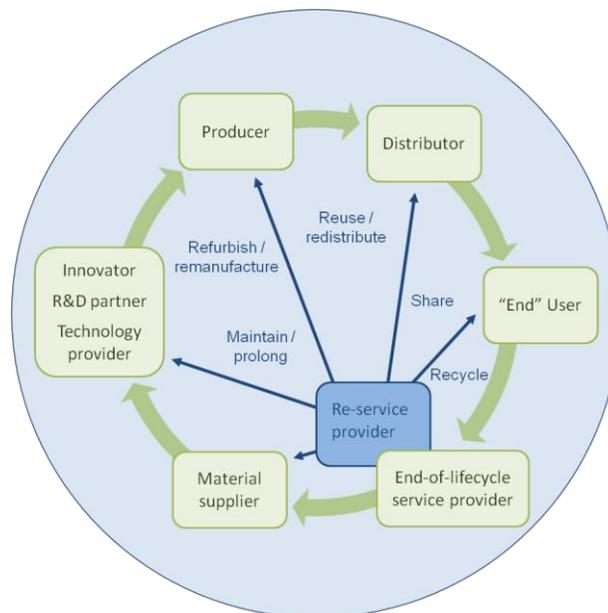


Figura 6.3: mapa conceptual de economía circular (Aminoff, Valkokari, & Kettunen, 2016).

Capítulo 6: Impacto ambiental, social y económico

En 2016, la producción de WPC alcanzó valores de 1.1 millones de toneladas al año en EEUU, 900 mil en China y 260 mil en Europa (López & Rojas, 2018).

El sector de los materiales compuestos es uno de los materiales con mayor crecimiento anual, con cifras representativas para EEUU de 18% y para el continente europeo de un 14% (López & Rojas, 2018) .

Tabla 6.1: Resumen del impacto social, económico y ambiental de los materiales que componen el WPC (elaboración propia).

Categoría	Resultado análisis
Económica	<ul style="list-style-type: none">• Ingreso salarial del reciclador• Beneficio económico del productor• Beneficio económico de toda la cadena productiva
Social	<ul style="list-style-type: none">• Nuevas fuentes de empleo• Productividad laboral
Ambiental	<ul style="list-style-type: none">• Reciclaje• Disminución de residuos• Disminución de recursos naturales• Disminución de contaminación de suelos, afluentes, atmósfera y océanos• Reutilización de materiales en desuso• Disminución de muerte de especies marinas

6.3 Análisis económico

A modo de ejemplo, se realizó la comparación de precios de una terraza de 4 x 10 m, una construida con madera de pino impregnado y otra con WPC. (Tabla 6.2). Para simplificar los cálculos se tomó como supuesto que la terraza se levantaría sobre un radier nivelado y que los *deck* se instalarían sobre vigas de madera previamente construidos.

Para fijar los paneles de WPC a las vigas y que estos queden unidos entre sí, se utilizan conectores invisibles (clip) que permiten la dilatación de este tipo de *deck* (dilatación de 2 a 3 mm por metro lineal (LAS AMERICAS, 2014)), los cuales se ponen en la cantería del machihembrado del WPC y se atornillan a las vigas (Fig.6.4).

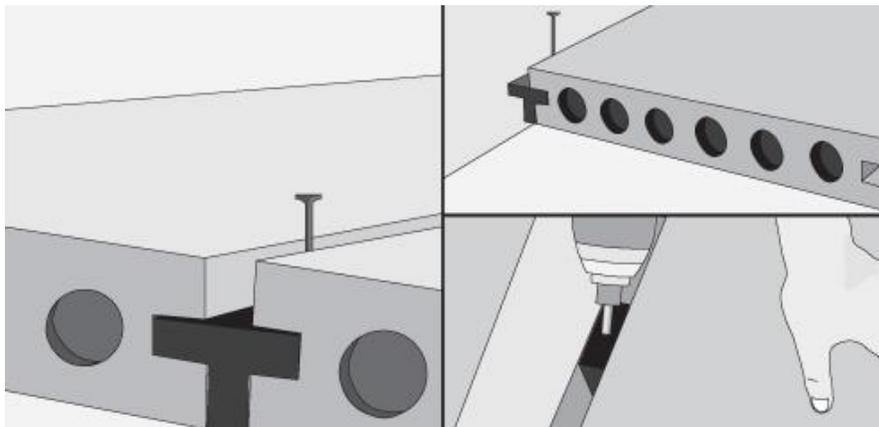


Figura 6.4: Instalación de los clip sobre las vigas (SODIMAC, 2013).

La terraza realizada con pino impregnado se instaló de manera convencional, atornillando los tablones de madera sobre las vigas.

Capítulo 6: Desarrollo de materiales en base a WPC

Tabla 6.2: Comparación de precios en Chile de los materiales (elaboración propia).

Marca	Tipo de deck	Medidas	Precio (c/u)	Precio terraza
New tech wood	WPC	280 x 14.5 x 2.2 cm	\$15.390	\$1.515.915
-	Pino	2 x 3"x3.20 m	\$2.550	\$397.800

Nota: se trabajó con valores de la empresa SODIMAC.

Los tipos de *decks* utilizados son muy distintos en cuanto a resistencia, durabilidad y precios. Sin embargo, la madera requiere de protección y mantenimiento constante, ya que, al ser material orgánico se degrada a la intemperie. El mantenimiento va a depender de las inclemencias climáticas, si estas son muy extremas puede ser cada 12 o 18 meses, de lo contrario cada 2 años o cuando la pintura, barniz o impregnante lo requieran (SODIMAC, 2009).

CAPÍTULO 7 CONCLUSIONES

El compuesto plástico madera, está formado por polímeros termoplásticos como el PE, PP y PVC. Su mayor aplicación es en usos de materiales a la intemperie.

La utilización de distintos agentes acoplantes ayuda a mantener una buena adhesión entre el polímero y la madera, disminuyendo los espacios vacíos y microfracturas internas, lo que incrementa las propiedades mecánicas y evita que la madera presente en el compuesto quede expuesta al ambiente. Los porcentajes de agentes acoplantes más utilizados van desde el 3% al 5%, concentraciones mayores no afectan significativamente la unión interfacial.

Existen diferentes formulaciones y concentraciones de WPC. Estas van a depender del uso que se le quiera dar y la forma de procesado, pero para usos a la intemperie el polímero más recomendable es el PP por su mayor resistencia y rigidez, con concentraciones que van del 50% al 80% en masa de matriz polimérica, esto para que ocurra una encapsulación completa y una buena distribución de la madera.

Para medir las propiedades y características del WPC se utilizan técnicas de caracterización como mecánica, térmica, morfológica, reológica y estructural.

Analizando la composición del material compuesto y comparándolo con polímeros puros, se puede decir que la incorporación de la madera en la matriz polimérica muestra un incremento de la rigidez en el compuesto, reflejándose en el aumento del módulo de flexión. Del mismo modo los cambios en la resistencia a la flexión se relacionan directamente con el tipo de madera utilizada.

Por otra parte, la resistencia a la tracción se ve disminuida con el aumento de la proporción de la fibra o polvo de madera y el módulo de tracción se ve

Capítulo 7: Conclusiones

influenciado por las mismas condiciones que el módulo de flexión, presentando el mismo comportamiento.

Las propiedades como dureza y resistencia al impacto presentan variaciones negativas con la inserción de altos contenidos de madera en la matriz, mostrando requerimientos bajos en consumo de energía para romper el material.

Por otra parte, el aumento de la estabilidad dimensional se ve fuertemente relacionada con el porcentaje de polímeros a utilizar, mostrando mejores resultados con el aumento del contenido de matriz polimérica en el compuesto.

Dependiendo del tipo de madera y matriz polimérica utilizada, y la proporción de los materiales, se obtiene un WPC más o menos denso. La densidad se puede controlar por medio de espumantes.

Las pruebas térmicas son necesarias para seleccionar las condiciones de procesado del WPC y analizar su estructura cristalina; la morfológica, analiza la microestructura del compuesto, con esta se puede observar la encapsulación de la fibra, espacios vacíos, fibras fracturadas, dispersión de las partículas, etc.; la reológica da muestra de la viscosidad del material y, por último, la estructural detecta contaminantes en el compuesto.

En la fabricación del WPC se utilizan residuos sólidos como el plástico y la madera; si bien el plástico es un material muy versátil, el cual se utiliza en muchos ámbitos de la vida diaria, la contaminación que está produciendo es evidente y es por su nula degradación, poca reutilización y reciclaje. Por otra parte, la madera de uso forestal genera agotamiento de agua y nutrientes del suelo, por lo que la fabricación de WPC, aparte de disminuir el uso de la madera y dar una nueva vida a residuos plásticos, ayuda a la disminución del impacto ambiental negativo, fomentando el crecimiento económico sostenible y generando nuevas fuentes de empleo.

Capítulo 7: Conclusiones

Contar con una economía circular donde se pueda dar nueva vida a materiales en desuso, es de gran importancia, dado que una proporción significativa de recursos no renovables está disminuyendo y los precios de los recursos naturales están aumentando.

Si bien para la fabricación del WPC se utilizan residuos, lo que disminuye los costos, este producto se vende en el mercado a mayor precio que la madera tratada.

Al cotizar los distintos materiales se pudo evidenciar que la madera de pino impregnado tiene un valor muy por debajo del WPC, aunque estos últimos poseen ventaja en cuanto a resistencia y mantenimiento, ya que solo requiere de limpieza con agua. La madera por otra parte necesita constante protección con productos químicos como barnices e impregnantes, para evitar una degradación acelerada.

Bibliografía

BIBLIOGRAFÍA

AMBIENTE, M. D. M. (2018, agosto 3). LEY-21100 03-AGO-2018 MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. Recuperado 2 de diciembre de 2018, de <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=1121380&buscar=21100>

Aminoff, A., Valkokari, K., & Kettunen, O. (2016). Mapping Multidimensional Value(s) for Co-creation Networks in a Circular Economy. En H. Afsarmanesh, L. M. Camarinha-Matos, & A. Lucas Soares (Eds.), *Collaboration in a Hyperconnected World* (pp. 629-638). Springer International Publishing.

Antikainen, M., & Valkokari, K. (2016). A Framework for Sustainable Circular Business Model Innovation. *Technology Innovation Management Review*, 6(7), 5-12.

Arandes, J. M., Bilbao, J., & Valerio, D. L. (2004). RECICLADO DE RESIDUOS PLÁSTICOS, 18.

Ashby. (2013). *Materials and the Environment*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2010-0-66554-0>

Beltrán, M., & Marcilla, A. (2012). *Tecnología de polímeros procesado y propiedades*. Alicante: une.

Caselli, J. G., & Aguirre, D. S. (2015). *Industria Forestal Primaria en Chile*, 178.

Callister, W. (2007). *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales 2*. Barcelona: Reverté.

Cimav. (s. f.). *Microscopia Electronica de Barrido - CIMAV Unidad Monterrey*. Recuperado 1 de diciembre de 2018, de <http://mty.cimav.edu.mx/sem/>

Bibliografía

Corma. (4 de Octubre de 2018). *USO DE BIOMASA Y SUS DERIVADOS*. Obtenido de <http://www.corma.cl>

Cruz, J., Alonso, S., Estrada, A., & Zitzumbo, R. (2016). OPTIMIZACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS DE UN COMPUESTO DE PET/MADERA MEDIANTE DISEÑO DE EXPERIMENTOS PARA MEZCLAS. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 643.

Cui, Y., Lee, S., Noruziaan, B., Cheung, M., & Tao, J. (2008). Fabrication and interfacial modification of wood/recycled plastic composite materials. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 39(4), 655-661.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2007.10.017>

Friedrich, D., & Luible, A. (2016). Investigations on ageing of wood-plastic composites for outdoor applications: A meta-analysis using empiric data derived from diverse weathering trials. *Construction and Building Materials*, 124, 1142-1152.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.123>

Frene, C., & Núñez, M. (2010). Hacia un nuevo Modelo Forestal en Chile. *Bosque Nativo*, 28-29.

Hildegard Fulcanelli. (s. f.). *reologia polimeros*. Recuperado de <https://es.slideshare.net/quautequetztliquilotzin5/reologia-polimeros>

Ivar do Sul, J. A., & Costa, M. F. (2014). The present and future of microplastic pollution in the marine environment. *Environmental Pollution*, 185, 352-364.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.10.036>

Bibliografía

Jiménez,E. (2017). ¿Cuánto plástico hay en el mundo? Recuperado 29 de octubre de 2018, de <http://www.greenpeace.org/espana/es/Blog/cunto-plastico-hay-en-el-mundo/blog/59905/>

José M Arandes, J. B. (2004). RECICLADO DE RESIDUOS PLÁSTICOS. *Revista Iberoamericana de Polímeros*.

Kalpakjian, S., & Schmid, S. (2002). *Manufactura, ingeniería y tecnología*. México.

Khanam, P. N., & AlMaadeed, M. A. A. (2015). Processing and characterization of polyethylene-based composites. *Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science*, 1(2), 63-79. <https://doi.org/10.1179/2055035915Y.0000000002>

LAS AMERICAS. (2014). Deck compuesto WPC – Las Américas. Recuperado 1 de enero de 2019, de <https://www.americas.cl/producto/deck-compuesto-wpc/>

López, & Rojas. (2018). (PDF) Factores que influncian las propiedades mecánicas, físicas y térmicas de materiales compuestos madero plásticos. Recuperado 27 de diciembre de 2018, de https://www.researchgate.net/publication/326855553_Factores_que_influencian_las_propiedades_mecanicas_fisicas_y_termicas_de_materiales_compuestos_madero_plasticos

Long, G. (1 de Septiembre de 2009). *La Industria Forestal de Chile*. Obtenido de <https://www.amchamchile.cl>

Mansilla, H., Lizama, C., Gutarra, A., & Rodriguez, J. (s.f.). TRATAMIENTO DE RESIDUOS LÍQUIDOS DE LA INDUSTRIA DE. 285.

Bibliografía

Mariano. (20 de septiembre de 2012). *www.blogger.com*. Obtenido de tecnologiadelosplasticos.blogspot.com

Martínez, Y., R., R., Álvarez, D. A., García, M., & Martínez, E. (2014). Evaluación de las propiedades físico-mecánicas de los tableros de madera plástica producidos en Cuba respecto a los tableros convencionales. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*.

Márquez, A. J., & Maza, G. B. (2003). Application of Differential Scanning Calorimetry (DSC) at the characterization of the virgin olive oil. *Grasas y Aceites*, 54(4), 403-409. <https://doi.org/10.3989/gya.2003.v54.i4.228>

MMA. (2018a). Encuestas Nacionales del Medio Ambiente – MMA. Recuperado 2 de diciembre de 2018, de <http://portal.mma.gob.cl/encuestas-nacionales-del-medio-ambiente/>

MMA. (2018b). Ley de fomento al Reciclaje – MMA. Recuperado 29 de diciembre de 2018, de <http://portal.mma.gob.cl/residuos/ley-de-fomento-al-reciclaje/>

Moreno, P., Rodrigue, D., Yann, G., Ballerini, A., & Gacitúa, W. (2013). CARACTERIZACIÓN MECÁNICA Y MORFOLÓGICA DE TERMOPLÁSTICOS RECICLADOS ESPUMADOS REFORZADOS CON SUB

Moya Villablanca, C., Poblete Wilson, H., & Valenzuela Hurtado, L. (2012). Propiedades físicas y mecánicas de compuestos de polietileno reciclado y harinas de corteza y madera de *Pinus radiata* fabricados mediante moldeo por inyección. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 14(1), 13-28. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2012000100002>

Bibliografía

ONU. (2018a, junio 5). O nos divorciamos del plástico, o nos olvidamos del planeta. Recuperado 29 de octubre de 2018, de <https://news.un.org/es/story/2018/06/1435111>

ONU. (2018b, octubre 12). La paradoja de América Latina: a más desarrollo más basura; a más basura no más desarrollo. Recuperado 30 de octubre de 2018, de <https://news.un.org/es/story/2018/10/144356>

ONU Medio ambiente. (2018). Principales productores de plástico firman acuerdo global contra la contaminación. Recuperado 29 de octubre de 2018, de <http://www.unenvironment.org/es/news-and-stories/comunicado-de-prensa/principales-productores-de-plastico-firman-acuerdo-global>

PRODUCTOS DE MADERA. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 15(1), 03-16. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2013005000001>

PRADO, J. A. (2015). PLANTACIONES FORESTALES MAS ALLA DE LOS ÁRBOLES. *CORMA*.

PNUMA. (2017, febrero 23). PNUMA emprende campaña contra el plástico en los océanos. Recuperado 29 de octubre de 2018, de <https://news.un.org/es/story/2017/02/1374211>

Poonam; et al., R. A. P. D. (s. f.). *Interactive Environmental Educatiaon Book VIII*. Pitambar Publishing. Recuperado de https://books.google.cl/books?id=8_d2Wkgq_rYC

Ratanawilai, T., & Taneerat, K. (2018). Alternative polymeric matrices for wood-plastic composites: Effects on mechanical properties and resistance to natural weathering. *Construction and Building Materials*, 172, 349-357. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.266>

Bibliografía

Rahal, R., & Sleiman, J. (2013). *ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICO, ECONÓMICO Y FINANCIERO PARA LA PRODUCCIÓN DE COMPUESTOS DE MADERA Y PLÁSTICO EN VENEZUELA.*

Bibliografía

Rivera, D. M. (2017). Análisis del Impacto Económico, Social y Ambiental de la Gestión de Residuos Sólidos Urbanos en Unidades Cerradas de Vivienda de la Ciudad de Pereira., 96.

Rodriguez, C., & Gamba, O. (2008). *PLAN DE NEGOCIOS PARA EL DISEÑO DE ARTICULOS FABRICADOS EN MADERA PLASTICA PARA LA INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCION.*

Setälä, O., Norkko, J., & Lehtiniemi, M. (2016). Feeding type affects microplastic ingestion in a coastal invertebrate community. *Marine Pollution Bulletin*, 102(1), 95-101. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.11.053>

Sierra. (2018). Guerra contra los plásticos desechables: ¿cuánto ha avanzado Latinoamérica? Recuperado 2 de diciembre de 2018, de <https://es.mongabay.com/2018/07/plasticos-desechables-leyes-latinoamerica/>

SINIA. (2018). Residuos – SINIA. Recuperado 2 de diciembre de 2018, de <http://sinia.mma.gob.cl/temas-ambientales/residuos/>

SODIMAC. (2009). ¿Cómo proteger terraza de madera? Recuperado 2 de enero de 2019, de <https://www.hagaloustedmismo.cl/paso-a-paso/proyecto/308-como-proteger-terrazza-de-madera.html>

SODIMAC. (2013). ¿Cómo instalar un deck con soportes regulables? Recuperado 1 de enero de 2019, de <https://www.hagaloustedmismo.cl/paso-a-paso/proyecto/885-como-instalar-un-deck-con-soportes-regulables.html>

Solís, M. E., & Lisperguer, J. H. (2005). Impact and Tensile Strength of Wood-Plastic Composites. *Información tecnológica*, 16(6), 21-25. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642005000600004>

Bibliografía

Tarté, R. (1986). *Silvicultura de especies promisoras para producción de leña en América Central: resultados de cinco años de investigación*. Bib. Orton IICA / CATIE.

Turku, I., Kärki, T., & Puurtinen, A. (2018). Durability of wood plastic composites manufactured from recycled plastic. *Heliyon*, 4(3), e00559.

<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018.e00559>Witte, J. (2004). *Maderas del sur de Chile: árboles, aplicaciones y procesos*. Editorial Universitaria.

Yañez, A. (2016). *Tratamiento superficial de materiales compuestos de madera y plástico (WPCs) para mejorar sus propiedades de adhesión*. Alicante.