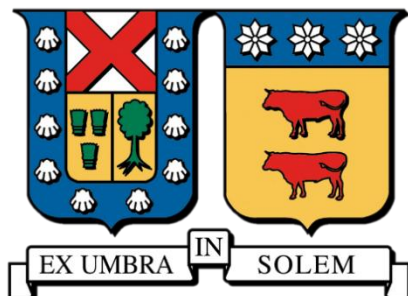


**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA**

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

VALPARAÍSO – CHILE



**Desarrollo de prototipos de materiales biocompuestos a partir  
de biomasa lignocelulósica de plantas Cannabáceas en Chile.**

Tesis presentada por

**GABRIEL ALEJANDRO SANLLEHI OYANEDEL**

Como requisito para optar al título de

**INGENIERO MECÁNICO INDUSTRIAL**

Profesora Guía: **Dr. Ing. Sheila Lascano**

Co-referente: **Dr. Cristian Ramírez B.**

Valparaíso, marzo de 2021



*La tierra se está transformando, nosotras/os también.*

*La energía es la capacidad de los cuerpos para realizar un trabajo y producir cambios en ellos  
mismos o en otros cuerpos.*

# Agradecimientos

---

Este proyecto culmina una de las etapas más bellas de mi vida. Durante la universidad aprendí a conocerme mejor a mí mismo y sacar todo mi potencial. Aprendí a aprender y a modelar la realidad en base a principios de las leyes físicas de la naturaleza. Conocí gente maravillosa que me marca hasta el día de hoy, y comencé a emprender. No olvidaré jamás cada uno de los aprendizajes vividos en este periodo.

Luego de finalizar este proceso de investigación, termino maravillado por el mundo del I+D+i. Para iniciar y financiar esta misma búsqueda científica, tuve que emprender el proyecto “LYGNUM”, postular a fondos, “pitchear”, desarrollar un modelo de negocios factible, y desarrollar un MVP que permitiera conseguir el dinero para que, luego de 2 años de investigación, al fin sea posible concluir acerca de los prototipos desarrollados del material bioplástico abordado y nombrado como “Cannaplast”.

Quiero agradecer a mis padres y familiares, personas que me dotaron del capital cultural necesario para darme la oportunidad y el privilegio de aprender lo que aprendí, y de aplicarlo para la transformación de la sociedad.

A la familia que escogí, mis amigas y amigos, por creer siempre en mis capacidades, y aportarme con amor del bueno.

A mi compañera le agradezco desde lo más profundo del corazón, cada gota de lágrima y sudor que compartí con ella debido a las dificultades de este proceso de investigación. Además de apoyarme en contención emocional a lo largo de todo el proceso, me ayudó en incontables ocasiones a realizar aquellas tareas rutinarias y engorrosas necesarias para el desenlace de este proyecto, y que implicaban eternas jornadas de procesamiento de biomasa.

A mis profesores que me inspiraron a creer que la academia es una herramienta que debe ser utilizada para el bienestar de las personas y los ecosistemas; Violeta Glaría, Moisés Cañas, Maite Barros, Gabriela Castillo, Rimsky Espíndola, entre muchos otros.

A mis profesores guía, por aceptar acompañarme en esta investigación, con la humilde pretensión de desvelar el poco explorado mundo de los materiales biocompuestos en la ingeniería mecánica en Chile.

A cada uno de los laboratorios, profesores y ayudantes a cargo que permitieron desarrollar esta investigación. Al LOU (Laboratorio de Operaciones Unitarias), al Laboratorio de Alimentos de IQA UTFSM, al Laboratorio de Nanobiomateriales UTFSM, al Laboratorio de Biomecánica y Biomateriales USACH, al CREAS PUCV, y al Laboratorio de Metalurgia Extractiva UTFSM. También, agradezco a Fundación Daya y a su red solidaria de pacientes, por proporcionar la biomasa necesaria para obtener los biopolímeros.

A mí, por aceptar el desafío de introducirme en una investigación multidisciplinaria que escapa al conocimiento clásico del ingeniero mecánico, y se adentra en el apasionante mundo de la química y la biología.

A la empresa LABSUN SpA (Laboratorio Sustentable Natural), por encomendarme esta desafiante misión, no exenta de problemas, permanentes obstáculos, y riesgos. A pesar de todo lo aprendido y desarrollado en esta investigación, vinculado a los bioprocesos, al emprendimiento y a la gestión del riesgo, pude darme cuenta de lo importante y fundamental que es mantener un sano ambiente laboral al interior de cualquier organización. Porque no todos los problemas están contenidos en los pizarrones; los problemas más complejos están allá afuera, y muchos de ellos tienen que ver con preservar siempre un trato digno y humano entre los trabajadores y colaboradores de una organización.

A don Federico Santa María, por construir una maravillosa casa de estudios, contribuyendo así a “levantar al proletario de la patria, poniendo al alcance del desvalido meritorio llegar al más alto grado del saber humano”. Sin su visión de futuro, la presente investigación tampoco habría sido posible. Esta investigación también está dedicada a todas y todos aquellos que luchan día a día por construir un mundo más justo y ecológico. Porque no es suficiente desarrollar nuevas tecnologías sin desarrollar también los niveles de autoorganización de todas las clases sociales. La emergencia climática en la que nos encontramos es la amenaza más urgente hacia la especie humana, y las soluciones deben al menos responder a modelos basados en la complejidad de los sistemas y de la vida.

Estoy profundamente agradecido de la vida, por permitirme haber llegado hasta este punto, y haber atravesado los más inusitados desafíos para lograr aquello. Mi mayor aprendizaje, terminado este proceso, subyace en la resiliencia y resistencia mental con la que hay que surfear siempre, a la vida misma.

# Resumen

---

El desarrollo de bioplásticos a escala industrial se ha presentado como una alternativa considerable y hasta competitiva en algunos casos, frente a la utilización de plásticos y otros materiales sintéticos. Sin embargo, tres grandes desafíos en torno al mercado de los bioplásticos para la industria química son: 1) el desarrollo de nuevas materias primas renovables, 2) alcanzando costos competitivos y 3) asegurando una trazabilidad del impacto ambiental (Mohanty, 2011). Por otro lado, en Chile, los rastrojos de cultivos de cannabis autorizados por SAG generalmente son incinerados y no requieren acciones de mitigación ambiental, derivando en contaminación y riesgos a la salud de la población (Decreto 404, 1984).

Mediante esta investigación, se plantea procesar dichos rastrojos para diseñar prototipos de un material compuesto que resulte competitivo, respecto a ciertas propiedades mecánicas, frente a otros materiales sintéticos similares. Se perfila una alta resistencia a la tracción, y un elevado módulo elástico específico, considerando mezclas de ácido poliláctico (PLA), celulosa, lignina y PEG 400. Para ello, se efectúa un “fraccionamiento” de la biomasa, se preparan 8 muestras mediante conformado por solución, y se caracterizan mediante un ensayo de microtracción. A partir de los datos obtenidos, se calculan las propiedades mecánicas mencionadas, tanto teóricas como experimentales, y se evalúan los costos de fabricación a escala de laboratorio. Finalmente, se estudia el impacto ambiental del material, mediante un Análisis de Ciclo de Vida (ACV).

Se identificó a la probeta con mayor módulo específico teórico (6,68 GPa), cuya composición es PLA/celulosa/lignina, equivalente a 55/30/15 en %p/p. A dicha formulación se le estimó un costo de manufactura a escala de laboratorio de \$8.480 por muestra de 2 g. Por otro lado, se calcularon las propiedades mecánicas experimentales de las muestras, en donde los mayores valores se obtuvieron igualmente para la misma formulación. Se evidencia una gran diferencia entre los valores experimentales y teóricos, atribuibles al método de conformado de muestras, el cual no está optimizado para conseguir altas propiedades mecánicas. Posteriormente, el Análisis de Ciclo de Vida advierte un elevado consumo energético para fabricar el material a escala de laboratorio, lo cual se traduce en una elevada huella de carbono equivalente.

Finalmente, se constatan resultados prometedores y competitivos frente a otros materiales sintéticos similares, en cuanto a las propiedades mecánicas teóricas de los prototipos. Sin embargo, se propone continuar evaluando la preparación y caracterización de muestras con los biopolímeros trabajados, a través de otros métodos de manufactura orientados a la escala industrial, y con mayores niveles de eficiencia.

# Abstract

---

The development of bioplastics on an industrial scale has been presented as a considerable and even competitive alternative in some cases, compared to the use of plastics and other synthetic materials. However, three major challenges around the bioplastics market for the chemical industry are: 1) the development of new renewable raw materials, 2) reaching competitive costs and 3) ensuring traceability of the environmental impact (Mohanty, 2011). On the other hand, in Chile, the stubble of cannabis crops authorized by SAG are generally incinerated and do not require environmental mitigation actions, resulting in contamination and risks to the health of the population. (Decree 404, 1984).

Through this research, it is proposed to process said stubble to design prototypes of a composite material that is competitive, in certain mechanical properties, regarding other similar synthetic materials. A high tensile strength and a high specific elastic modulus are sought, considering mixtures of polylactic acid (PLA), cellulose, lignin and PEG 400. For this, a biomass “fractionation” is carried out, 8 samples are prepared by solution mixing, and characterized by a microtraction test. From the data obtained, the mechanical properties mentioned, both theoretical and experimental, are calculated, and manufacturing costs are evaluated on a laboratory scale. Finally, the environmental impact of the material is studied through a Life Cycle Analysis (LCA).

The specimen with the highest theoretical specific modulus (6.68 GPa) was identified, whose composition is PLA / cellulose / lignin, equivalent to 55/30/15 in %w/w. A laboratory scale manufacturing cost of USD \$5,400 per kg was estimated for said formulation. On the other hand, the experimental mechanical properties of the samples were calculated, where the highest values were also obtained for the same formulation. Great differences are found between the experimental and theoretical values, attributable to the sample shaping method, which is not optimized to achieve high mechanical properties. Subsequently, the Life Cycle Analysis shows a high energy consumption to manufacture the material on a laboratory scale, which translates into a high equivalent carbon footprint.

Finally, promising and competitive results are found compared to other similar synthetic materials, in terms of the theoretical mechanical properties of the prototypes. However, it is proposed to continue evaluating the preparation and characterization of samples with the biopolymers worked, through other manufacturing methods oriented to the industrial scale, and with higher levels of efficiency.

# Índice

---

|                                                                                            |      |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Resumen .....                                                                              | VI   |
| Abstract.....                                                                              | VII  |
| Nomenclatura.....                                                                          | XV   |
| Introducción .....                                                                         | XVII |
| Capítulo 1: Problemática.....                                                              | 1    |
| Capítulo 2: Objetivos .....                                                                | 2    |
| 2.1.    Objetivo general.....                                                              | 2    |
| 2.2.    Objetivos específicos.....                                                         | 2    |
| Capítulo 3: Fundamentos Teóricos.....                                                      | 3    |
| 3.1.    Biomasa lignocelulósica.....                                                       | 3    |
| 3.2.    Fibras naturales (Celulosa).....                                                   | 4    |
| 3.3.    Lignina.....                                                                       | 5    |
| 3.4.    Termoplásticos.....                                                                | 7    |
| 3.5.    Propiedades mecánicas.....                                                         | 8    |
| 3.6.    Microestructura y comportamiento térmico.....                                      | 9    |
| 3.7.    Bioplásticos.....                                                                  | 10   |
| 3.8.    PLA.....                                                                           | 12   |
| 3.9.    Plastificantes.....                                                                | 13   |
| 3.10.    Metodologías de procesamiento de biomasa.....                                     | 13   |
| 3.11.    Materiales compuestos.....                                                        | 14   |
| 3.12.    Estimación teórica de módulo de rigidez en un material compuesto.....             | 16   |
| 3.13.    Estado del arte en materiales biocompuestos de PLA y biomasa lignocelulósica..... | 18   |
| 3.14.    Análisis de ciclo de vida (ACV).....                                              | 19   |
| Capítulo 4: Materiales y procedimiento experimental.....                                   | 21   |
| 4.1.    Obtención y caracterización de la materia prima.....                               | 21   |
| 4.1.1.    Preparación de los tallos.....                                                   | 22   |
| 4.1.2.    Obtención de lignina.....                                                        | 23   |

|             |                                                                           |    |
|-------------|---------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.1.3.      | Obtención y tratamiento superficial de celulosa. ....                     | 25 |
| 4.2.        | Diseño de experimentos. ....                                              | 26 |
| 4.3.        | Preparación de las muestras. ....                                         | 27 |
| 4.4.        | Caracterización mecánica de las muestras. ....                            | 30 |
| 4.5.        | Análisis del Ciclo de vida del Material, costos e impacto ambiental. .... | 31 |
| 4.5.1.      | Análisis de Inventario (LCI en inglés). ....                              | 32 |
| 4.5.2.      | Análisis de Impacto Ambiental (LCAI en inglés) ....                       | 32 |
| 4.5.3.      | Interpretación. ....                                                      | 32 |
| Capítulo 5: | Resultados y Análisis .....                                               | 33 |
| 5.1.        | Caracterización materia prima. ....                                       | 33 |
| 5.2.        | Muestras obtenidas y sus propiedades mecánicas. ....                      | 35 |
| 5.3.        | Análisis microscópico de las muestras elaboradas. ....                    | 43 |
| 5.4.        | Diagramas de flujo para la elaboración de las muestras. ....              | 44 |
| 5.5.        | Costos de fabricación de la muestra “L15F30”. ....                        | 46 |
| 5.6.        | Indicadores de impacto ambiental. ....                                    | 48 |
| 5.6.1.      | Análisis de Inventario (LCI). ....                                        | 48 |
| 5.6.2.      | Análisis de Impacto Ambiental (LCAI). ....                                | 50 |
| 5.6.3.      | Interpretación. ....                                                      | 51 |
| Capítulo 6: | Propuesta de Valor. ....                                                  | 53 |
| 6.1.        | Biopolímeros. ....                                                        | 53 |
| 6.2.        | Material. ....                                                            | 54 |
| 6.3.        | Producto simulado. ....                                                   | 55 |
| 6.4.        | Otras aplicaciones. ....                                                  | 56 |
| Capítulo 7: | Conclusiones .....                                                        | 57 |
| Capítulo 8: | Recomendaciones y proyecciones .....                                      | 58 |
| Capítulo 9: | Bibliografía .....                                                        | 59 |
| Anexos      | .....                                                                     | 64 |
| Anexo A.    | Fibras. ....                                                              | 64 |
| Anexo C.    | Tabla de propiedades de probetas con nanotubos de carbono. ....           | 67 |

|                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Anexo D. Cálculo de módulo específico teórico y experimental. ....                  | 69 |
| Anexo E. Fotografías en microscopio de las muestras. ....                           | 71 |
| Anexo F. Propiedades de probetas sometidas a ensayo de tracción. ....               | 79 |
| Anexo G. Curvas granulométricas del proceso de tamizado de celulosa y lignina. .... | 80 |

## Índice de Tablas.

|                                                                                                                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1. Propiedades de lignina, obtenidas a partir de distintos métodos (Wang <i>et al.</i> , 2016).....                                                                                   | 7  |
| Tabla 2. Clasificación de materiales termoplásticos, en base al origen de la materia prima, y a la capacidad de biodegradarse en ambientes determinados (Vázquez <i>et al.</i> , 2016)..... | 10 |
| Tabla 3. Comparación de precios entre bioplásticos y plásticos sintéticos (Oever <i>et al.</i> , 2017). 11                                                                                  |    |
| Tabla 4. Propiedades del PLLA y PET (Dasso, 2017). ....                                                                                                                                     | 12 |
| Tabla 5. Propiedades del PLA manufacturado por la empresa Nature Works (Minnetonka, USA). ....                                                                                              | 13 |
| Tabla 6. Propiedades del PEG 400 (Merck, Sigma Aldrich). ....                                                                                                                               | 13 |
| Tabla 7. Métodos realizados a la muestra de biomasa lignocelulósica (tallos), para identificar la disponibilidad de los biopolímeros de lignina y celulosa presentes. ....                  | 22 |
| Tabla 8. Diseño de experimentos para el prototipado del material compuesto. ....                                                                                                            | 27 |
| Tabla 9. Objetivo y alcance del Análisis de Ciclo de Vida realizado. ....                                                                                                                   | 31 |
| Tabla 10. Resultados de análisis bioquímico para muestra de tallos de Cannabis*. ....                                                                                                       | 33 |
| Tabla 11. Tablas de granulometría asociadas a la tamización de los biopolímeros de lignina y celulosa. ....                                                                                 | 34 |
| Tabla 12. Resultados obtenidos a partir de la elaboración de probetas del material compuesto. 35                                                                                            |    |
| Tabla 13. Propiedades teóricas y concentraciones en % p/p de las probetas obtenidas. Se destaca en rojo la probeta con el mayor módulo de rigidez específica. ....                          | 37 |
| Tabla 14. Propiedades y valores del módulo específico para las probetas ensayadas (elaboración propia). ....                                                                                | 40 |
| Tabla 15. Comparación módulos de rigidez para distintos materiales. ....                                                                                                                    | 42 |
| Tabla 16. Costos asociados a manufactura de probeta seleccionada, en base a la masa por probeta; por kilo, y por pallet. ....                                                               | 46 |
| Tabla 17. Costos de manufactura de Cannaplast L15F30 [USD/kg], desglosado según tipo de costo. ....                                                                                         | 47 |
| Tabla 18. Comparación de costos de manufactura de Cannaplast L15F30 [USD/kg], versus otros materiales. ....                                                                                 | 48 |

|                                                                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 19. Inputs en el análisis “de la cuna a la puerta” realizado en la presente investigación. .               | 49 |
| Tabla 20. Outputs en el análisis “de la cuna a la puerta” realizado en la presente investigación.<br>.....       | 49 |
| Tabla 21. Valores de los flujos de materiales y energía, para ACV realizado. ....                                | 49 |
| Tabla 22. Consumo energético por proceso en ACV realizado. ....                                                  | 50 |
| Tabla 23. Equivalencia en kilos CO <sub>2</sub> , por kW h, por pallet producido, en ACV realizado. ....         | 51 |
| Tabla 24. Comparación de consumo energético de Cannaplast L15F30, versus otros materiales.<br>.....              | 51 |
| Tabla 25. Compilación de propiedades de ciertas fibras naturales y sintéticas (Liu, 2017). ....                  | 64 |
| Tabla 26. Composición química de tallos de plantas (Akil <i>et al.</i> , 2011). ....                             | 65 |
| Tabla 27. Resumen de propiedades de materiales obtenidos en revisión del estado del arte. ....                   | 66 |
| Tabla 28. Comparación de propiedades teóricas y experimentales de la muestra N2F20 y L15F30. ....                | 67 |
| Tabla 29. Cálculos para obtener el módulo específico para cada muestra. ....                                     | 70 |
| Tabla 30. Fotografías en microscopio con aumento 4X, 10X, 20X y 50X de la muestra L10F15.<br>.....               | 71 |
| Tabla 31. Fotografías en microscopio con aumento 4X de la muestra L10F30. ....                                   | 72 |
| Tabla 32. Fotografías en microscopio con aumento 4X de la muestra L15F15. ....                                   | 73 |
| Tabla 33. Fotografías en microscopio con aumento 4X de la muestra L15F30. ....                                   | 74 |
| Tabla 34. Fotografías en microscopio con aumento 4X de la muestra P10L10F15. ....                                | 75 |
| Tabla 35. Fotografías en microscopio con aumento 4X de la muestra P10L10F30. ....                                | 76 |
| Tabla 36. Fotografías en microscopio con aumento 4X de la muestra P10L15F15. ....                                | 77 |
| Tabla 37. Fotografías en microscopio con aumento 4X de la muestra P10L15F30. ....                                | 78 |
| Tabla 38. Propiedades de probetas sometidas a ensayo de tracción. ....                                           | 79 |
| Tabla 39. Distribución del tamaño de partículas de una muestra de aserrín de madera de pino (Aguila, 2017). .... | 81 |

## Índice de Figuras

|                                                                                                                                                                                                    |   |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|
| Figura 3.1. <i>Constitución estructural de una célula de fibra vegetal (Thomas, 2011).</i> .....                                                                                                   | 4 |
| Figura 3.3. <i>Distribución esquemática de macromoléculas más abundantes en una fibra vegetal (Machado, 2016).</i> .....                                                                           | 5 |
| Figura 3.4. <i>Diagrama de Flujo de Procesos para la extracción de lignina, con una hidrólisis ácida preliminar, a partir de bagazo de caña, y cáscaras de arroz (Kun y Pukánszky, 2017).</i> .... | 6 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 3.6. Curvas de esfuerzo-deformación ante una aplicación de cargas mediante tracción, a probetas poliméricas, en donde a) es un material frágil, b) es una material plástico, c) es un material elastomérico (Callister y Rethwish, 2009) .....                                                                                              | 8  |
| .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 10 |
| Figura 3.7. Volumen específico versus temperatura, hasta el enfriamiento, y desde el derretimiento líquido, para polímeros totalmente amorfos (curva A), semicristalinos (curva B), y cristalinos (curva C) (Callister y Rethwish, 2009). ....                                                                                                     | 10 |
| Figura 3.8. Capacidad global producida los años 2015-2016 (en barras solidas), y producción de la capacidad proyectada para el 2020 (barras sombreadas), de polímeros biobasados y biodegradables (en verde); polímeros biobasados y no biodegradables (en azul); y polímeros biodegradables basados en fuentes fósiles (Oever et al., 2017). .... | 11 |
| Figura 3.9. Pirámide de valorización de la biomasa (o de valorización en cascada) (Kretschmer et al., 2013). ....                                                                                                                                                                                                                                  | 14 |
| Figura 3.10. Clasificación de materiales compuestos según material en la matriz (Veinthal, 2017). ....                                                                                                                                                                                                                                             | 14 |
| Figura 3.11. Clasificación de materiales compuestos según material de relleno (Veinthal, 2017). ....                                                                                                                                                                                                                                               | 15 |
| Figura 3.13. Elementos del análisis de Inventario de Ciclo de Vida. En amarillo, los flujos de energía. En morado, los flujos de materiales. En azul los flujos de agua (Graedel, 1998). ....                                                                                                                                                      | 20 |
| Figura 4.1. A la izquierda, tallos de Cannabis cortados en trozos de largo aproximado de 3-5 [cm]. A la derecha, aserrín fino de madera de tallo de Cannabis con tamaños menores a 1 [mm]. Elaboración propia. ....                                                                                                                                | 21 |
| Figura 4.2. Esquema del procedimiento de preparación de las materias primas iniciales (tallos de Cannabis). Elaboración propia. ....                                                                                                                                                                                                               | 22 |
| Figura 4.3. Esquema del procedimiento de obtención de lignina a partir de troncos de madera seca de tallos de Cannabis. ....                                                                                                                                                                                                                       | 23 |
| Figura 4.5. Lignina en “escamas”, obtenida luego de evaporación por ventana refractaria. Elaboración propia. ....                                                                                                                                                                                                                                  | 25 |
| Figura 4.6. Esquema de preparación de las muestras a través del procedimiento de conformado por solución. ....                                                                                                                                                                                                                                     | 28 |
| Figura 4.7. Mezclas sonicadas de lignina y fibras de celulosa, en 4 distintas concentraciones, inmersas en solución de PLA disuelto en cloroformo. ....                                                                                                                                                                                            | 29 |
| Figura 4.8. Esquemmatización de especímenes obtenidos para cada muestra. ....                                                                                                                                                                                                                                                                      | 31 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 32 |
| Figura 4.9. Esquema metodológico del Análisis de Inventarios aplicado al proceso estudiado, en base a (Graedel, 1998), incluyendo el análisis desde el cultivo, hasta la manufactura (“cradle-to-gate”), y considerando los materiales (en morado) y energía (en amarillo) que fluyen a través de cada proceso. .... | 32 |
| Figura 5.1. (a) Fibras de celulosa obtenidas a partir del fraccionamiento de tallos de Cannabis. (b) Muestra de lignina soda, seca y en polvo, obtenida a partir del fraccionamiento de tallos de Cannabis. Elaboración propia. ....                                                                                 | 34 |
| Figura 5.2. Fibras de celulosa retenidas por la malla superior en el proceso de tamizado. Elaboración propia. ....                                                                                                                                                                                                   | 35 |
| Figura 5.4. Curvas de resultados obtenidos a partir de ensayo de tracción para probetas verticales (imagen y resultados proporcionados por Laboratorio de Biomecánica y Biomateriales USACH). ....                                                                                                                   | 38 |
| Figura 5.5. Curvas de resultados obtenidos a partir de ensayo de tracción para probetas horizontales (imagen y resultados proporcionados por Laboratorio de Biomecánica y Biomateriales USACH). ....                                                                                                                 | 39 |
| Figura 5.7. Gráfica del módulo de Young versus la densidad de los materiales. En rojo, se posiciona al material diseñado de manera teórica, y en amarillo, el material obtenido en laboratorio (Callister y Rethwish, 2009). ....                                                                                    | 42 |
| Figura 5.8. Fotografía en microscopio de la muestra L15F30 a un aumento de 4X (Laboratorio de Nanobiomateriales UTFSM). ....                                                                                                                                                                                         | 43 |
| Figura 5.9. Diagrama de flujo para la obtención de biomasa lignocelulósica. Cada operación unitaria se asocia a inputs y outputs. ....                                                                                                                                                                               | 44 |
| Figura 5.11. Diagramas de flujo para el proceso de fraccionamiento de biomasa lignocelulósica (tallos), en biopolímeros de lignina y celulosa (fina). ....                                                                                                                                                           | 45 |
| Figura 5.13. Comparación (en %), de consumo energético por proceso requerido para la manufactura de 1 pallet de carga a partir de Cannaplast L15F30, de polipropileno mezclado con fibra de vidrio (PP+GF), y de polipropileno mezclado con relleno de fibra “Reed” (PP+RF). ....                                    | 52 |
| Figura 6.1. Fotografía esquemática de pallets de carga fabricados a partir de fibras naturales compactadas. ....                                                                                                                                                                                                     | 55 |
| Figura A.1. Estructura de las fibras de cáñamo (Liu, 2017). ....                                                                                                                                                                                                                                                     | 64 |

|                                                                                                                                                                                                            |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura A.2. <i>Clasificación de fibras de plantas obtenidas a partir de distintas secciones de plantas (Ramesh, 2017). Se destaca la fibra de cáñamo, como fibra obtenida a partir de tallos.</i><br>..... | 65 |
| Figura C.1. <i>Fotografía de muestra N2F20 (elaboración propia).</i> .....                                                                                                                                 | 67 |
| Figura G.2. <i>Curva granulométrica para la lignina obtenida.</i> .....                                                                                                                                    | 80 |

# Nomenclatura

---

$CO_2$ : Dióxido de carbono [kg].

$CO_{2eq}$ : Dióxido de carbono equivalente [kg].

PLA: Ácido Poliláctico.

PP: Polipropileno.

PET: Polietileno tereftalato.

PP+GF: Material compuesto por una matriz de polipropileno, relleno con fibra de vidrio.

$\sigma$ : Esfuerzo aplicado a la probeta [MPa].

E: Módulo de elasticidad [GPa].

$\epsilon$ : Deformación nominal [mm/mm].

%p/p: Porcentaje peso-peso.

$P_H$ : Propiedad del sistema híbrido.

$P_i$ : Propiedad del material i.

$V_i$ : Fracción volumétrica del material i.

$V_r$ : Fracción volumétrica del material de relleno.

$V_m$ : Fracción volumétrica del material utilizado como matriz.

$V_v$ : Fracción volumétrica de la porción de vacío en el material compuesto.

$v_r$ : Volumen del material de relleno.

$v_m$ : Volumen del material utilizado como matriz.

$M_r$ : Fracción másica del material de relleno.

$M_m$ : Fracción másica del material utilizado como matriz.

$m_c$ : Masa del material compuesto [g].

$m_r$ : Masa del material de relleno [g].

$m_m$ : Masa del material empleado como matriz [g].

$\rho_c$ : Densidad del material compuesto [g/ml].

$\rho_r$ : Densidad del material de relleno [g/ml].

$\rho_m$ : Densidad del material empleado como matriz [g/ml].

$E_{sup}$ : Módulo de elasticidad superior (teórico) [GPa].

$E_{inf}$ : Módulo de elasticidad inferior (teórico) [GPa].

$\epsilon_n$ : Deformación en la probeta, en el sentido de la aplicación de la carga [mm/mm].

$E_m$ : Módulo elástico del material empleado como matriz [GPa].

$E_r$ : Módulo elástico del material de relleno [GPa].

$E_{esp}$ : Módulo de elasticidad específico (Módulo específico) [GPa].

$E_c$ : Módulo de elasticidad del material compuesto [GPa].

$kW\ h$ : Consumo de energía utilizada en un proceso industrial, equivalentes a los kilowatts utilizados en una hora.

$kW\ h/pallet$ : Consumo de energía equivalente a la manufactura de un pallet de carga, medida en kilowatts utilizados en una hora.

# Introducción

---

Dentro de la compleja sociedad globalizada que opera en el planeta tierra, se han gatillado una serie de preocupaciones que afectan a todo el globo. Las alarmantes tasas de emanación de gases de efecto invernadero (GEI), y la inestable seguridad de los suministros industriales de materias primas han apremiado la necesidad de sustituir innovadoras fuentes de biomasa carbono neutral, por materias primas convencionales basadas en combustibles fósiles, para la producción de materiales de interés industrial (Weiss *et al.*, 2012).

Como consecuencia de lo anterior, es que numerosas empresas han comenzado a implementar desde los años 90 una serie de innovaciones en sustentabilidad, superando la lógica de “prevención de la contaminación”, para avanzar al concepto de “química verde” (Iles y Martin, 2012). Este concepto, hace referencia a un marco referencial de producción química que apunta a reducir los riesgos ambientales y de salud humana, y a avanzar hacia la sustentabilidad (Iles y Martin, 2012). Además, alinea las estrategias de modelo de negocio de las compañías, con un crecimiento financiero sustentado en el desarrollo de nuevos productos y procesos tecnológicos (Aurora *et al.*, 2001).

Esta nueva estrategia de negocio considera actualizar los procesos convencionales, para reducir costos, aumentar eficiencias, y crear nuevos mercados para productos innovadores y amigables con el medio ambiente (Iles y Martin, 2012). A raíz de aquello, ha crecido el interés por el uso de biopolímeros como potencial sustituto a ciertos materiales sintéticos y basados en petróleo (Spiridon *et al.*, 2014). La utilización de biopolímeros en la industria de los plásticos, se ha visto como una opción en la disminución de problemáticas ambientales, en donde predomina su uso como “refuerzos de base biológica”, quienes entregan los beneficios de ser biodegradables, tener un mínimo costo, una baja densidad, y un alto módulo de elasticidad específico (Badamsi y Ibrahim, 2017). Además, en muchos casos, los materiales biobasados también añaden ciertas funcionalidades mecánicas y de seguridad; permiten aumentar la capacidad de amortiguar vibraciones, de aumentar la resistencia al impacto, la resistencia a la flexión, o permiten agregar beneficios de salud a los operarios (Quarshie y Carruthers, 2014).

Una industria que ha presentado gran interés en los últimos años en este tipo de materiales, es la industria automotriz. Este tipo de material se conoce como “material compuesto de madera plástica” (del inglés WPC, “Wood Plastic Composite”). Al año 2012, la industria automotriz europea usó 90.000 toneladas de materiales compuestos con fibras naturales, y 60.000 toneladas de materiales compuestos de madera plástica. En promedio, cada auto nuevo producido en Europa contiene cerca de 4 [kg] de materiales compuestos con fibras naturales, elevándose la cifra a 25-30 [kg] en algunos casos. Además, se estima que un 5% de las fibras utilizadas para esta industria corresponden a fibras de cáñamo (Quarshie y Carruthers, 2014).

Sin embargo, la mayoría de los bioplásticos y materiales compuestos de base biológica no pueden competir económicamente en su actual estado de desarrollo tecnológico, con un mercado dominado por plásticos basados en petróleo, cuyos precios son significativamente más bajos (Mohanty *et al.*, 2002). Algunos desafíos que la industria de los bioplásticos ha presentado en los últimos años, incluyen la disminución de costos de producción (alcanzables, generalmente, gracias a las economías de escala), el aumento del rendimiento y la productividad, el desarrollo de mejores suministros de materias primas, un menor impacto ambiental que los plásticos sintéticos tradicionales, modelos de negocios que sean financieramente sostenibles, y correctos mecanismos de comunicación de la trazabilidad del impacto ambiental (Iles y Martin, 2012).

En base a lo anterior, es que el alcance de esta investigación se orienta principalmente a evaluar el desarrollo de nuevos suministros de materias primas de origen local (Región de Valparaíso, Chile) para la fabricación de materiales biocompuestos obtenidos a partir de tallos de descarte de Cannabis industrial con fines medicinales. Para la elaboración de prototipos del material biocompuesto, se utiliza ácido poliláctico (PLA) como matriz, y biopolímeros obtenidos a partir de dicha materia prima, como relleno.

# Capítulo 1: Problemática

---

La presente memoria de título, la cual da origen a la investigación del material aquí referido como “Cannaplast L15F30”, surge a partir de la Economía Circular como estrategia de negocio, dentro de LABSUN SpA (Laboratorio Sustentable Natural).

LABSUN, es una Start-Up que tiene por objetivo la investigación, desarrollo e innovación (I+D+i) entorno a productos que promuevan el bienestar de las personas y del medioambiente, mediante procesos sustentables y de alta tecnología. Dentro de este laboratorio, uno de los proyectos de mayor envergadura, es "VAPOLAB", el cual tiene como misión generar extractos de Cannabis y plantas medicinales de alto valor medicinal, mediante  $CO_2$  supercrítico, para el tratamiento de enfermedades asociadas a dolor crónico, enfermedades neurológicas y casos oncológicos. A partir de esta línea de investigación, a inicios del año 2019 surge en LABSUN el proyecto de economía circular en torno a la *Cannabis Sativa sp.*, considerando los residuos generados a partir de su procesamiento; en donde las flores se utilizarían para la generación de los extractos medicinales; las raíces para investigar su potencial biorremediador de suelos contaminados con metales pesados; y los tallos, para la generación de bioplásticos.

El potencial del uso del Cannabis es tal, que dicha planta es una de las primeras cultivadas por la humanidad, la cual data sus primeros inicios en China al año 700 a 5000 a.C. Ello, debido a la versatilidad de sus aplicaciones; como alimento (semillas), como medicina (flores), o como vestimenta (fibras) (Hui-Chen Lu, 2015). Las fibras de Cannabis han tenido un extendido uso industrial hasta mediados del siglo XX, debido principalmente a su buena resistencia a la tracción y alto módulo de elasticidad.

Actualmente, los tallos de Cannabis medicinal e industrial en Chile, deben ser eliminados según Ley 20.000, y el método generalmente utilizado para aquello, es la combustión. En dicho proceso, el 100% de los elementos resultantes del proceso químico son perdidos, y finalmente migran hacia la ecosfera. Sin embargo, esta pérdida industrial representa un alto potencial como materia prima. Inspirados en el “Hemp Car”, prototipado por Henry Ford en 1941 (Hinojosa, 2017), es que LABSUN genera el desafío abordado en el presente documento: "Generar prototipos de bioplásticos reforzados, a partir de tallos de *Cannabis Sativa sp.*, provenientes del procesamiento de dicha planta para extractos de valor medicinal".

# Capítulo 2: Objetivos

---

## 2.1. Objetivo general.

Diseñar y prototipar un material compuesto de matriz termoplástica, y reforzado con biopolímeros obtenidos a partir de biomasa residual de tallos de plantas cannabáceas en Chile.

## 2.2. Objetivos específicos.

- 1) Diseñar un material biocompuesto, utilizando Ácido Poliláctico (PLA) como matriz, y biopolímeros de celulosa y lignina como carga y aditivo, respectivamente.
- 2) Fabricar probetas de prototipos del material mediante el método de “conformado por solución”, y caracterizar en microscopio y mediante ensayo de tracción.
- 3) Analizar los prototipos del material obtenido, incluyendo el cálculo del módulo específico, los costos de manufactura, el Diagrama de Flujo de Procesos, y la aplicación de un Análisis de Ciclo de Vida (para compararlo con otros materiales existentes en el mercado).
- 4) Concluir acerca de los resultados encontrados en torno a una propuesta de valor.

## Capítulo 3: Fundamentos Teóricos

---

### 3.1. Biomasa lignocelulósica.

La biomasa, y sus materiales derivados, han sido considerados como la única fuente de carbono orgánico sustentable en la tierra, y el equivalente perfecto al petróleo para la producción de combustibles y productos químicos con cero emisiones de carbono (Furkan y Remzi, 2015). En este contexto, la biomasa lignocelulósica, la cual es la biomasa más abundante y más “bio-renovable” en la tierra, tiene una importancia crítica. La biomasa lignocelulósica se compone de tres polímeros básicos; celulosa, hemicelulosa y lignina, en conjunto con pequeñas cantidades de otros compuestos, como grupos acetilo, minerales, y otros sustituyentes fenólicos (Furkan y Remzi, 2015). Se estima que la madera de tallos corresponde al 55% de los recursos madereros de la Unión Europea al año 2010 (Mantau., et al, 2010).

Los compuestos reforzados con fibras de plantas y otros biopolímeros, han logrado un desarrollo importante en los últimos años debido a las ventajas significativas de procesamiento, su calidad de biodegradables, bajos costos, baja densidad relativa, una alta resistencia específica, y su naturaleza renovable. Se proyecta encontrar cada vez más aplicaciones en los próximos años, a medida que aumente la presión tanto desde el público, como desde el aspecto legislativo (Ramesh *et al.*, 2017).

El sector forestal ocupa el tercer lugar en exportaciones chilenas, industria que ha presentado un importante crecimiento en los últimos años (Águila, 2017). Sin embargo, la utilización de los subproductos forestales tiene un alto grado de desaprovechamiento. El aserrín, viruta, despuntes, entre otros, se almacena en grandes cerros o se quema en calderas sin poseer un mayor valor agregado o alcanzar una eficiencia energética mayor. Estos residuos logran constituir un 20% del total de la troza. En base a aquel escenario, el estudio realizado por Águila analizó la utilización de dichos residuos para el prototipado de “madera plástica” (WPC, Wood Plastic Composites). Se utilizó aserrín de madera con una matriz de Resina de Poliéster Insaturado (UP) y orientó la investigación para determinar un material con las mejores propiedades con la menor densidad posible, consiguiendo resultados favorables para el módulo de elasticidad y la resistencia al impacto.

### 3.2. Fibras naturales (Celulosa).

Las fibras extraídas de plantas se han convertido en una importante clase de refuerzo en materiales. Se calculó que, para finales del 2020, las fibras derivadas de fuentes biológicas habrían representado el 28% del mercado total de materiales de refuerzo (Ramesh *et al.*, 2017).

Se destaca el uso de las fibras naturales debido a una serie de ventajas, en particular de fibras como la de cáñamo. Dichas fibras, exhiben resistencias a la tracción entre 400-1000 MPa, y un módulo de elasticidad entre 25-70 GPa (Thomas, 2011). Además, se distingue su amplia disponibilidad, baja densidad, bajos costos, y propiedades mecánicas satisfactorias, lo que las hace alternativas atractivas ante la fibra de vidrio, u otras fibras sintéticas (Ramesh, 2017).

Sin embargo, factores como la mala humectabilidad, la mala adherencia entre fibra y matriz, y el daño de la fibra durante el proceso de fabricación, son las principales causas de la reducción de la resistencia de dichos materiales de refuerzo en la matriz (Ramesh, 2017).

Una fibra elemental se modela como un tubo microscópico, con largos que van desde 1 hasta 50 [mm]. Las fibras se componen por tubos concéntricos de distintos tipos de estructuras de celulosa, como se aprecia en la Figura 3.1. La celulosa cumple una función estructural en la planta, otorgando rigidez a la estructura (Thomas, 2011). Las propiedades mecánicas de referencia de la celulosa de cáñamo y otras fuentes naturales, se aprecian en la Tabla 25, Anexo B.

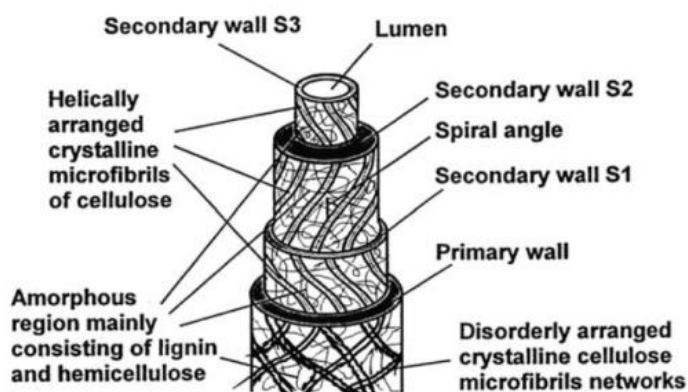


Figura 3.1. Constitución estructural de una célula de fibra vegetal (Thomas, 2011).

Uno de los métodos de preparación de los tallos, para simplificar el proceso de descortezado, consiste en el enriado, proceso que consiste en sumergir la materia prima en un espacio con cierta humedad y temperatura por alrededor de 10 días. (Thomas, 2011). Sin embargo, un método de desarrollo del proceso global de obtención de fibras a partir de tallos de plantas de cáñamo, se observa en la Figura 3.2, desarrollado por el Instituto Leibniz de Ingeniería Agrícola.

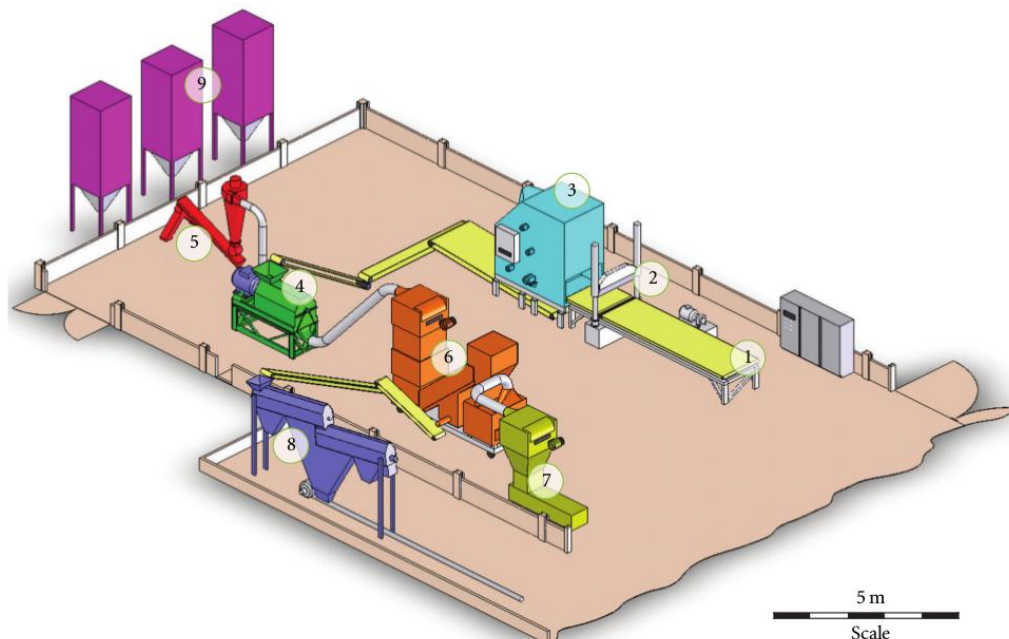


Figura 3.2. Planta piloto de procesamiento de caña, propuesta por el Instituto Leibniz de Ingeniería Agrícola. Los números refieren a: 1) alimentador de biomasa; 2) cortadora de paja; 3) abridor de paja; 4) decorticación; 5) separador de polvo; 6) limpiador de fibra; 7) empacadora de fibra; 8) limpieza de astillas; 9) filtro de aire (Pecenka y Gusovius, 2012).

Se han reportado resultados excelentes de adhesión interfacial en materiales compuestos, entre la superficie de los refuerzos de fibras de celulosa, y la matriz, cuando se realizan procedimientos de tratamiento superficial. Por ello, Ramesh recomienda sumergir las fibras en solución alcalina, para eliminar trazas de compuestos no deseables en el material compuesto, y preparar las capas exteriores de las estructuras de celulosa para optimizar el enlace con las cadenas de los otros biopolímeros (Ramesh, 2017).

### 3.3. Lignina.

La lignina es el segundo biopolímero más abundante en la naturaleza, después de la celulosa. Es un polímero complejo y aromático, de alto peso molecular. Se encuentra en la estructura de la pared vegetal, y representa entre un 15% y 30% del peso total de muestra de biomasa (Thomas, 2011). En la Figura 3.3 se puede observar su rol dentro de la estructura de una fibra vegetal, asociada a la unión de las estructuras de celulosa y hemicelulosa (Machado, 2016).

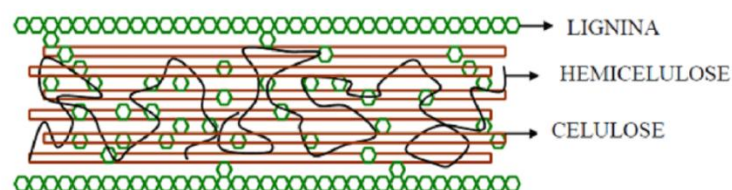


Figura 3.3. Distribución esquemática de macromoléculas más abundantes en una fibra vegetal (Machado, 2016).

Las principales fuentes de lignina en el área industrial se estiman en unos 70 millones de toneladas diarias producidas a partir del procesamiento de celulosa para fabricar papel (Jianlei Yang, 2019). Uno de los procedimientos para la extracción de lignina a partir de biomasa, consiste en la “extracción por soda”. En dicho proceso, se sumerge el material en un medio alcalino, en donde el producto obtenido se filtra y seca, hasta conseguir lignina en altas concentraciones en un “licor negro”, como se muestra en la Figura 3.4 (Kun y Pukánszky, 2017).

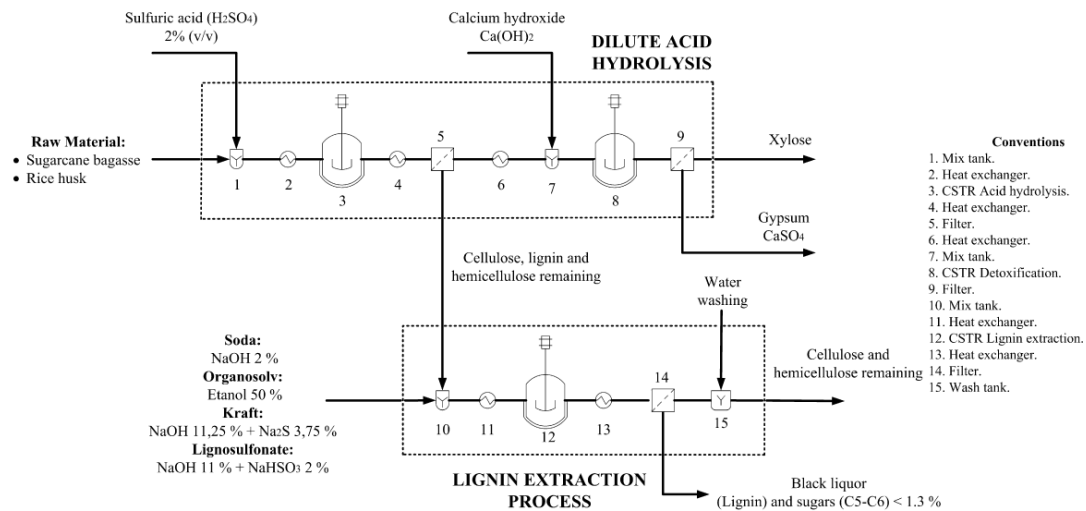


Figura 3.4. Diagrama de Flujo de Procesos para la extracción de lignina, con una hidrólisis ácida preliminar, a partir de bagazo de caña, y cáscaras de arroz (Kun y Pukánszky, 2017).

El proceso de extracción de lignina implica, necesariamente, aplicar métodos “drásticos” para separar la lignina de la pared celular del tejido vegetal. El procedimiento más común en la industria, incluye el procesamiento para la obtención de una pulpa, que será posteriormente deslignificada. La composición de la lignina obtenida, y su rendimiento, depende del método de extracción, el tipo de solvente, el tiempo, la temperatura y el pH de la muestra durante las distintas etapas del proceso (Radotic y Micic, 2016).

Además, se ha reportado su uso en materiales biocompuestos, en particular, mezclada con una matriz de PLA, y ante la aplicación de climatización acelerada (Spiridon *et al.*, 2014). Se observaron resultados destacables como agente de estabilización térmica, y material de refuerzo, al aumentar el módulo de Young ante un ensayo de impacto. En la Tabla 1, se muestran propiedades de referencia de mezclas entre lignina y óxido de polietileno.

Tabla 1. Propiedades de lignina, obtenidas a partir de distintos métodos (Wang *et al.*, 2016).

| Lignina      | Biomasa de origen            | Polímero de mezcla [%p/p]      | Módulo de Young [GPa] | Resistencia a la tracción [MPa] | Método de preparación |
|--------------|------------------------------|--------------------------------|-----------------------|---------------------------------|-----------------------|
| <b>Soda</b>  | Eucalyptus ( $M_w = 4.000$ ) | PEO ( $M_w = 100.000$ ) [5]    | 2,5                   | 11                              | Mezclado por fusión   |
| <b>Kraft</b> | “Hardwood” ( $M_w = 2.400$ ) | PEO ( $M_w = 100.000$ ) [0-75] | 1-4,2                 | 13-25                           | Mezclado por fusión   |

\*PEO: óxido de polietileno.

### 3.4. Termoplásticos.

Los polímeros se clasifican en termoplásticos o termoestables, en base a la respuesta originada ante fuerzas mecánicas y temperaturas elevadas, y dependen de su estructura molecular dominante (Callister y Rethwish, 2009). Un polímero termoplástico, es un material que experimenta una disminución del módulo elástico cuando se eleva la temperatura, y eventualmente, “funde”, es decir, se comporta como un fluido. Una vez que el polímero está en estado líquido, puede ser moldeado y deformado, y recuperar sus propiedades una vez se enfría y solidifica. Este proceso es 100 % reversible, y puede hacerse las veces que se quiera (capacidad de ser reciclables). Sin embargo, el proceso se vuelve irreversible cuando el polímero se calienta a muy altas temperaturas y ocurre una degradación térmica.

Molecularmente, cuando se aumenta la temperatura, dentro del material polimérico disminuyen las fuerzas de los enlaces secundarios (puentes de hidrógeno y fuerzas de Van der Waals). Se observa entonces, que aumenta el movimiento relativo de las cadenas cuando se aplica un esfuerzo. La gran mayoría de los polímeros de estructura lineal, y algunos de estructura ramificada con cadenas flexibles, son termoplásticos. Estos materiales son normalmente manufacturados mediante la aplicación conjunta de calor y presión.

Los materiales poliméricos poseen una gran versatilidad para manufacturar productos, debido a su plasticidad durante la producción, lo que les permite ser prensados, derramados, o extruidos en formas casi infinitas; como fibras, laminas, tubos, botellas, cubos y cajas (Asiplas, 2016). En la Figura 3.5 se pueden observar algunos tipos de plásticos comunes en el mercado.

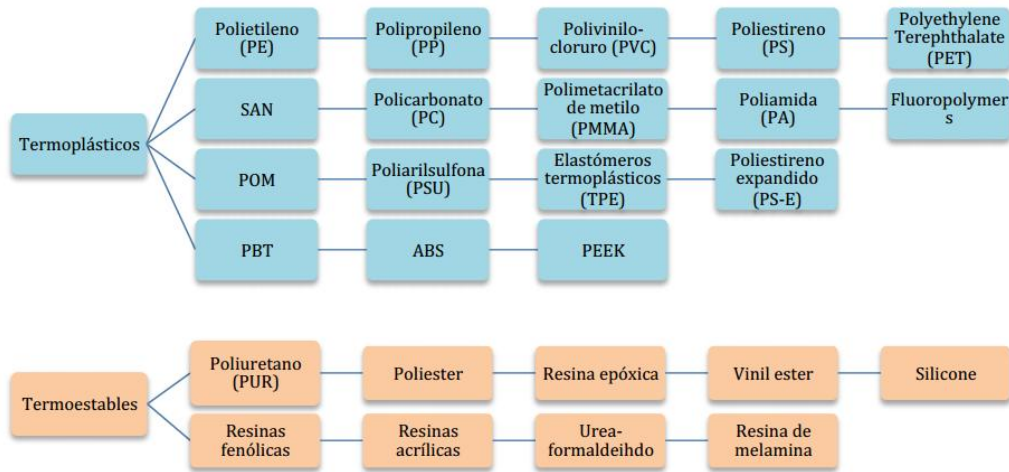


Figura 3.5. Materiales más comunes catalogados como plásticos (Plastics – the Facts, 2016).

### 3.5. Propiedades mecánicas.

Para caracterizar un material polimérico y determinar sus propiedades mecánicas, se emplea generalmente el ensayo esfuerzo-deformación (Callister y Rethwish, 2009). Según Callister, los materiales poliméricos presentan tres tipos distintos de comportamiento en la gráfica esfuerzo-deformación, según se observa en la Figura 3.6. La curva A corresponde al comportamiento esfuerzo-deformación de un polímero frágil, el cual se fractura al ser sometido a bajas cargas, se deforma elásticamente. El comportamiento de la curva azul B muestra una deformación elástica inicial. Luego, el material fluye y se deforma plásticamente. Por último, el material de la curva C corresponde a un material elastomérico, el cual es deformado elásticamente a bajas aplicaciones de cargas. En la curva b), es posible observar el esfuerzo de fluencia  $\sigma_y$  (nivel de tensiones para el cual termina el rango elástico, y comienza la deformación plástica). Es posible observar, además, la Resistencia a la Tracción TS (máximo valor en magnitud de tensión soportada por la probeta al momento de la fractura).

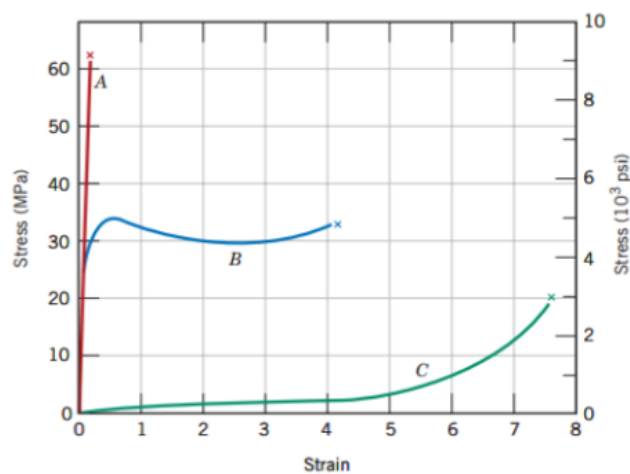


Figura 3.6. Curvas de esfuerzo-deformación ante una aplicación de cargas mediante tracción, a probetas poliméricas, en donde a) es un material frágil, b) es una material plástico, c) es un material elastomérico (Callister y Rethwish, 2009)

Se define, a partir de la misma curva esfuerzo-deformación, el Módulo de Young, o (Módulo elástico) como el grado en que una estructura se deforma al aplicarle una carga. Para el rango elástico de un material, esta propiedad se define según la Ecuación (1), también conocida como Ley de Hooke.

$$\sigma = E\epsilon \quad (1)$$

Donde:

- $\sigma$ : Esfuerzo aplicado en [MPa].
- $E$ : Módulo de elasticidad [MPa].
- $\epsilon$ : Deformación nominal [mm/mm].

### 3.6. Microestructura y comportamiento térmico.

La cristalización de un polímero, se refiere al proceso en que, hasta el enfriamiento, se produce una fase sólida y altamente ordenada (cristalina), a partir de una fusión líquida de mayor temperatura, y que tiene una estructura molecular altamente aleatoria. Así, las cadenas van nucleando y formando cristalitos, o granos. La transformación de fusión es el proceso inverso que ocurre cuando el polímero se calienta (Callister y Rethwish, 2009). Cabe señalar, que no existen polímeros completamente cristalinos. Por ello, para el diseño y fabricación de plásticos, se considera una mezcla con una porción amorfa (confiere dureza a un polímero, o la habilidad de poder plegarse sin romperse), y una porción cristalina que entrega más resistencia (Callister y Rethwish, 2009).

Para el diseño y el procesamiento de polímeros, es necesario tener en cuenta tres fenómenos que ocurren en los polímeros respecto a sus estructuras cristalinas y amorfas, en relación al cambio de temperatura: la cristalización, la fusión o fundido, y la transición vítrea. Estas tres fases ocurrirán de distinta manera, dependiendo de la estructura polimérica del material; polímeros cristalinos, amorfos, o semicristalinos. Los tres fenómenos mencionados, son clasificados en base a la temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ), y a la temperatura de fusión ( $T_m$ ). En la Figura 3.7 se observa la variación del volumen específico en función de la temperatura, para un polímero totalmente amorfo (curva A), para uno semicristalino (curva B), y para uno cristalino (Callister y Rethwish, 2009).

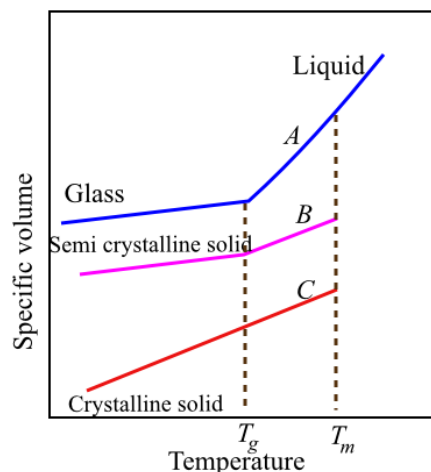


Figura 3.7. Volumen específico versus temperatura, hasta el enfriamiento, y desde el derretimiento líquido, para polímeros totalmente amorfos (curva A), semicristalinos (curva B), y cristalinos (curva C) (Callister y Rethwish, 2009).

### 3.7. Bioplásticos.

Los bioplásticos se definen, según la organización “European Bioplastics”, como plásticos que son biobasados, biodegradables, o que reúnen ambas características (Vázquez *et al.*, 2016). En la Tabla 2, se observan los distintos tipos de bioplásticos según su capacidad de degradarse, y según su origen (biológico y renovable, o sintético).

Actualmente el 65% de los bioplásticos se utiliza en envases y productos de vida corta, aunque ha aumentado su empleo en medicina, agricultura, fabricación de juguetes, electrónicos, herramientas y autopartes. Si bien se estimó que la participación de los bioplásticos en el mercado fue menor al 1% en el 2010, este sector presenta un crecimiento vigoroso, con tasas anuales de crecimiento del 30%. Se espera que la producción y consumo siga creciendo, especialmente en el área de los materiales biobasados – no biodegradables usados en aplicaciones de uso general. Este fenómeno permitiría, a través de economías de escala, bajar costos y ser más competitivos en el mercado (Vázquez *et al.*, 2016).

Tabla 2. Clasificación de materiales termoplásticos, en base al origen de la materia prima, y a la capacidad de biodegradarse en ambientes determinados (Vázquez *et al.*, 2016).

|              | No biodegradable                | Biodegradable                     |
|--------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| Biobasado    | Bio PE, bio PET, bio PA, bioPTT | PLA, PHA, PBS, mezclas de almidón |
| No biobasado | PET, PP, PE                     | PBAT, PCL                         |

El bioplástico que tuvo una mayor capacidad instalada de manufactura, a los años 2015-2016, corresponde al bio Pet, seguido por el acetato de celulosa. La fabricación de bioplásticos a nivel mundial es exhibida en la Figura 3.8, en donde también se muestra la proyección de esa instancia, a la fabricación estimada al año 2020.

Si bien, la industria de los bioplásticos se ha desarrollado en los últimos años, su cuota de mercado es aun marginal respecto a la capacidad instalada de fabricación de plásticos convencionales basados en fuentes fósiles. Entre los años 2007 y 2016, la capacidad instalada de fabricación de bioplásticos alcanzó en promedio, apenas el 1% del total de la capacidad global instalada de material plástico (Oever *et al.*, 2017).

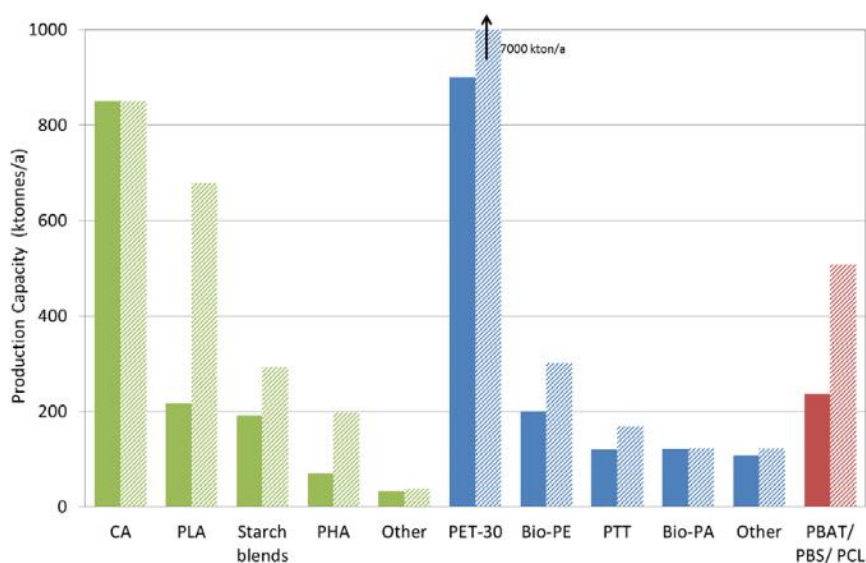


Figura 3.8. Capacidad global producida los años 2015-2016 (en barras solidas), y producción de la capacidad proyectada para el 2020 (barras sombreadas), de polímeros biobasados y biodegradables (en verde); polímeros biobasados y no biodegradables (en azul); y polímeros biodegradables basados en fuentes fósiles (Oever *et al.*, 2017).

A la fecha de abril del 2017, la Universidad de Wageningen estudió los costos asociados a materiales bioplásticos, y materiales sintéticos, para aplicaciones orientadas al packaging (Oever *et al.*, 2017). En la Tabla 3, se muestra la diferencia de precios entre ambos tipos de materiales.

Tabla 3. Comparación de precios entre bioplásticos y plásticos sintéticos (Oever *et al.*, 2017).

| Material | Precio [ $\frac{\text{€}}{\text{kg}}$ ] | Densidad [ $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ ] |
|----------|-----------------------------------------|---------------------------------------------|
| PET      | 0,85-1,05                               | 1370-1390                                   |
| HDPE     | 1,2-1,5                                 | 930-970                                     |
| PLA      | 2                                       | 1250                                        |
| bio PBS  | 4                                       | 1260                                        |

### 3.8. PLA.

Dentro de los polímeros biodegradables de origen renovable, el ácido poliláctico, o PLA (polylactic acid), ha sido uno de los más utilizados a nivel mundial, sobre todo en la industria de los envases (Dasso, 2017). En 2013, la capacidad global de producción de ácido poliláctico fue de aproximadamente 320.000 toneladas, de las cuales el 90% provino de las seis principales productoras. Entre ellas, NatureWorks LLC es la mayor, abasteciendo el 42,5% del mercado, con una capacidad anual de 150.000 toneladas. Otros tipos de polímeros termoplásticos biodegradables y de origen biológico, como el PHA o el PBS, poseen costos mayores en el mercado, y una menor disponibilidad de stock en laboratorios de materiales.

En las primeras etapas de desarrollo, el PLA no tuvo muchas aplicaciones debido a su limitado peso molecular, baja disponibilidad y alto costo comparado con otros polímeros comerciales. Sin embargo, había demostrado tener buena compatibilidad con el cuerpo humano, por lo que fue usado principalmente en el campo de la medicina, en aplicaciones tales como implantes y liberación controlada de drogas. Posteriormente, con el desarrollo de nuevas tecnologías de síntesis y la producción a gran escala, pudo ser obtenido a costos considerablemente menores, al tiempo que se alcanzaron mayores pesos moleculares, extendiéndose su uso a otras áreas como el embalaje, la industria textil y el desarrollo de materiales compuestos en general (Dasso, 2017).

El ácido poliláctico es un termoplástico biocompatible, biobasado y biodegradable, fácilmente procesable con los equipos convencionales utilizados en la industria de productos poliméricos y con un alto grado de transparencia y módulo elástico. Estas características lo convierten en un polímero idóneo para el envasado de alimentos. Sus propiedades se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Propiedades del PLLA y PET (Dasso, 2017).

| Material | E [GPa] | $\rho[\frac{g}{cm^3}]$ | Costo [US/kg] |
|----------|---------|------------------------|---------------|
| PLLA     | 1,5-3,5 | 1,24                   | 1,75-2,65     |
| PET      | 2,5-4   | 1,3-1,45               | 1,6-1,7       |

En condiciones estándar en una planta de compostaje, el PLA puede ser biodegradado a 45-70°C, con 40-68 % de humedad, un pH=8 y un compost apropiado. Puede degradarse al punto en que los fragmentos no resultan visibles en 30 o 40 días (Dasso, 2017). En la Tabla 5 se muestran la ficha técnica de los pellets de PLA manufacturados por la empresa Nature Works.

Tabla 5. Propiedades del PLA manufacturado por la empresa Nature Works (Minnetonka, USA).

| Propiedades físicas                  | Ingeo 4032D | Norma ASTM |
|--------------------------------------|-------------|------------|
| Índice de fluidez g/10 min (a 216°C) | 7           | D1238      |
| Densidad g/ml                        | 1,24        | -          |
| Resistencia a la tracción MPa        | 53          | D882       |
| Módulo en tracción GPa               | 3,5         | D882       |

### 3.9. Plastificantes.

Debido a que algunos plásticos presentan un comportamiento rígido y frágil bajo la zona de transición vítrea, como el PLA, es que en ocasiones se agregan algunos plastificantes para mejorar sus propiedades mecánicas. Algunos plastificantes de baja masa molecular, como el polietilenglicol (PEG), han demostrado ser bastante eficientes (Masirek *et al.*, 2007).

Este compuesto anteriormente nombrado, también es utilizado debido a sus propiedades dispersantes, lo que conlleva a un eventual aumento de la homogeneidad del material compuesto en que es utilizado. En la Tabla 6 se muestran ciertas propiedades físicas del PEG 400, a partir de la ficha técnica elaborada por Sigma Aldrich. A partir del ensayo de tracción realizado a mezclas con PLA y PEG, se han reportado mejoras en ciertas propiedades, como el alargamiento de rotura y la consiguiente ductilidad (Park *et al.*, 2011).

Tabla 6. Propiedades del PEG 400 (Merck, Sigma Aldrich).

| Propiedad                            | Valor   |
|--------------------------------------|---------|
| Forma física                         | Líquido |
| Rango promedio de peso molecular     | 380-420 |
| Densidad [g/cm <sup>3</sup> ] a 20°C | 1,13    |

### 3.10. Metodologías de procesamiento de biomasa.

Una de las metodologías estratégicas para priorizar decisiones para un uso eficiente de la biomasa, es el “aprovechamiento vía cascada”, expuesto gráficamente en la Figura 3.9, a través del triángulo de valorización de la biomasa. Con este método, se analiza el valor agregado económico que podría ser resultado de un volumen dado de biomasa. Desde productos de alto

valor, como químicos con propiedades farmacéuticas, hasta materiales a granel, como bioplásticos, y combustibles (Kretschmer *et al.*, 2013).

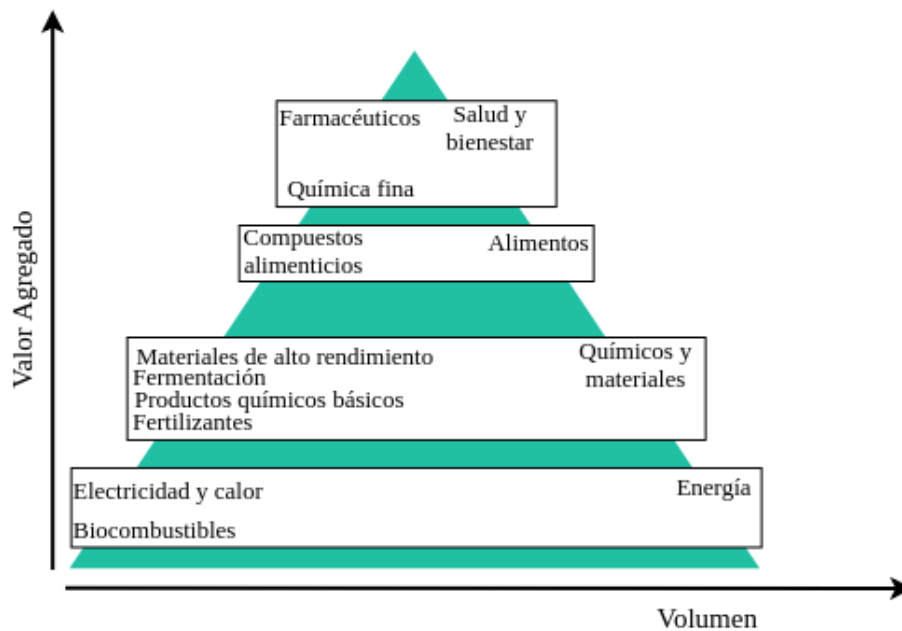


Figura 3.9. Pirámide de valorización de la biomasa (o de valorización en cascada) (Kretschmer *et al.*, 2013).

### 3.11. Materiales compuestos.

Los materiales compuestos se clasifican según el tipo de matriz y según el tipo de refuerzo. De acuerdo al material de la matriz, se clasifican en materiales compuestos de matriz metálica, cerámica o polimérica (Figura 3.10). Según el tipo de refuerzo, ordenan según material compuesto laminado, particulado y reforzados con fibras. Las partículas, a su vez, pueden tener distintas morfologías y/o tamaños. En caso de tratarse de fibras, estas pueden ser cortas, largas, entrelazadas formando tejidos o bien rellenos, como se observa en Figura 3.11.

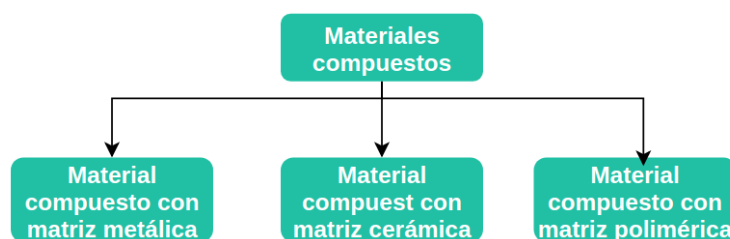


Figura 3.10. Clasificación de materiales compuestos según material en la matriz (Veinthal, 2017).

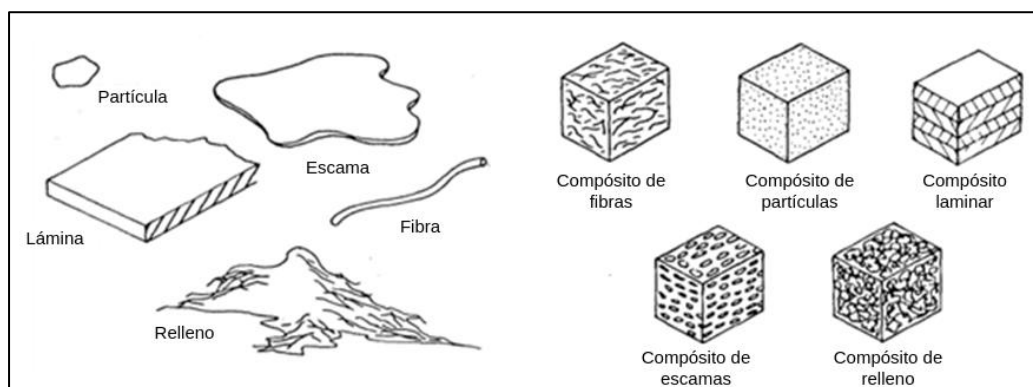


Figura 3.11. Clasificación de materiales compuestos según material de relleno (Veinthal, 2017).

El año 2017 se reportaron resultados destacables en el desarrollo de materiales compuestos con biopolímeros, resaltando un relativamente alto módulo elástico y resistencia específica (Veinthal, 2017). Asimismo, en términos de refuerzos, se destaca la introducción de nanofibras y nanopartículas en elementos como el packaging, con lo cual aumentan la resistencia mecánica del biopolímero, agregan propiedades antimicrobianas, y aumentan la vida útil del producto contenido (Kraśniewska et al, 2020). Sin embargo, no en todos los casos son biodegradables, y se requiere un mayor estudio de estas mezclas, para determinar la toxicidad hacia la salud humana (Din et al, 2020).

El desempeño mecánico del material compuesto, depende de factores como las propiedades del relleno y la matriz, el tamaño de las fibras, la habilidad de empaquetado de las fibras, la porosidad, las propiedades interfaciales entre la fibra y la matriz, y la orientación y concentración de fibras (Liu, 2017).

Dentro de los principales métodos de conformado de materiales compuestos, se destaca la presencia del conformado por fusión (uso de altas temperaturas y esfuerzos de corte), de la infusión de resina por vacío, y el conformado por solución (Díaz, 2012). El método de conformado por solución empleado para la presente investigación, se basa en un sistema solvente en donde el polímero es soluble, y los refuerzos son humedecidos en un disolvente, como cloroformo, y a una temperatura ambiente (Rane, *et al.*, 2018). Cuando se mezclan el polímero y el relleno en solución, las cadenas de polímeros se intercalan, y desplazan el disolvente dentro de las capas intermedias del material. Tras la eliminación del disolvente, la estructura intercalada permanece, y se obtiene el material compuesto de polímeros. La mezcla en solución de compuestos poliméricos implica la dispersión del material de relleno en una solución polimérica mediante agitación energética, evaporación controlada del disolvente y finalmente colada de película compuesta. La agitación se puede lograr mediante agitación

magnética, mezcla de cizallamiento, reflujo o el método de sonicación más comúnmente utilizado (Rane, *et al.*, 2018).

Este proceso de conformado ha sido extensivamente utilizado, principalmente debido a la alta eficiencia de dispersión de nanorellenos independientemente de la polaridad del polímero. Sin embargo, continúan significando un problema la efectiva remoción de la evaporación del solvente, así como su alto costo ante el escalamiento industrial (Tang *et al.*, 2019).

### 3.12. Estimación teórica de módulo de rigidez en un material compuesto.

En base a la regla de las mezclas (Ecuación 2), es posible calcular una propiedad determinada en un material compuesto, en función de la fracción volumétrica de los materiales que la componen (Callister y Rethwish, 2009).

$$P_H = P_1V_1 + P_2V_2 \quad (2)$$

En donde:

- $P_H$ : Propiedad del sistema híbrido.
- $P_1$ : Propiedad del material 1.
- $V_1$ : Fracción volumétrica del material 1.

Para desarrollar la Ecuación 2, se muestra a continuación la relación matemática para obtener la fracción volumétrica (Ec. 3), y fracción másica (Ec. 4) de un material compuesto.

$$V_r = \frac{v_r}{v_r + v_m} \quad (3)$$

$$M_r = \frac{m_r}{m_r + m_m} \quad (4)$$

En donde:

- $V_r$ : Fracción volumétrica del material de relleno.
- $v_r$ : Volumen del material de relleno.
- $v_m$ : Volumen del material utilizado como matriz.
- $M_r$ : Fracción másica del material de relleno.
- $m_r$ : Masa del material de relleno.
- $m_m$ : Masa del material empleado como matriz.

Las ecuaciones anteriores (Ec.4 y Ec. 5), provienen de la Ecuación 5 y Ecuación 6, y son válidas para calcular los valores del material de relleno, como también, para obtener los valores del material empleado como matriz.

$$M_r + M_m = 1 \quad (5)$$

$$V_r + V_m + V_v = 1 \quad (6)$$

En donde  $V_v$  es la fracción volumétrica de los vacíos en el material compuesto.

Utilizando las ecuaciones anteriores, es factible determinar el módulo específico teórico  $[\frac{E}{\rho}]$ , utilizando la ecuación de la densidad del material del compuesto:

$$\rho_c = \rho_r V_r + \rho_m V_m = \frac{\rho_r \rho_m}{\rho_m M_r + \rho_r (1 - M_r)} \quad (7)$$

En donde  $\rho_c$ ,  $\rho_r$  y  $\rho_m$  son las densidades del material compuesto, del material de relleno, y del material empleado como matriz (en  $\frac{g}{ml}$ ).

Las curvas del módulo de elasticidad superior e inferior, según bibliografía (Callister y Rethwish, 2009), marcan los límites del módulo de elasticidad experimental. Para obtener ambos modelos, se emplean las Ecuaciones 8 y 9. Finalmente, la Ecuación 10 muestra la manera de obtener el módulo de elasticidad específico

$$E_{sup} = \frac{\sigma}{\varepsilon_n} = E_m V_m + E_r V_r \quad (8)$$

$$E_{inf} = \frac{E_m E_r}{V_m E_r + V_r E_m} \quad (9)$$

$$E_{esp} = \frac{E_c}{\rho_c} \quad (10)$$

En donde:

- $E_{sup}$ : Módulo de elasticidad superior (teórico) [GPa].
- $E_{inf}$ : Módulo de elasticidad inferior (teórico) [GPa].
- $\sigma$ : Esfuerzo aplicado en la probeta [MPa].

- $\epsilon_n$ : Deformación en la probeta, en el sentido de la aplicación de la carga. [mm/mm]
- $E_m$ : Módulo elástico del material empleado como matriz [GPa].
- $E_r$ : Módulo elástico del material de relleno [GPa].
- $E_{esp}$ : Módulo de elasticidad específico (Modulo específico) [GPa].
- $E_c$ : Modulo de elasticidad del material compuesto [GPa].

### **3.13.Estado del arte en materiales biocompuestos de PLA y biomasa lignocelulósica.**

El estudio de materiales compuestos empleando una matriz de PLA, y refuerzos de fibras de cáñamo y lignina, ha manifestado el interés de la comunidad científica en los últimos años.

Sawpan (Sawpan, 2009) procesó probetas de PLA con fibra de cáñamo (10, 20 y 30 %p/p), a través de un extrusor de tornillo. Antes de aquello, las fibras fueron tratadas químicamente para aumentar la adhesión interfacial. Después de peletizar el material, se conformó por moldeo por inyección, y se realizó un ensayo de tracción. Se demostró que la formulación con un 30%p/p logró incrementar el módulo de Young, y la resistencia a la tracción. Asimismo, Masirek (Masirek *et al.*, 2007) realizó una investigación similar, pero consideró un batch de muestras con 10% de PEG (polietilenglicol), y otro batch sin PEG. Además de concluir que la presencia de fibra en la matriz de PLA aumentó el módulo elástico del material compuesto para el ensayo de tracción, evidenció que la presencia de PEG disminuye la elasticidad.

Por otro lado, se ha reportado investigaciones en mezclas con PLA y lignina, observando propiedades destacables en cuanto a propiedades térmicas y químicas. Spiridon (Spiridon *et al.*, 2014) formuló mezclas con PLA como matriz, y un 7%p/p de lignina, para proceder a someter a climatización acelerada a las muestras, además de ensayos mecánicos. Concluyó que, luego de la aplicación de climatización acelerada, se obtuvieron mejores resultados en sus propiedades mecánicas (resistencia al impacto, resistencia a la tracción, y el módulo de elasticidad). Otra investigación (Tanase-Opedal *et al.*, 2019) estudió las propiedades de un material biocompuesto por PLA como matriz, y lignina como refuerzo. Sin embargo, las probetas fueron obtenidas por manufactura aditiva. A los especímenes, se les observó la capacidad antioxidante (ante oxidación térmica y lumínica) y ciertas propiedades mecánicas. Se concluyó que los compuestos con alto contenido de lignina (40 %p/p) mostraron una mayor actividad antioxidante.

En la Tabla 27, incluida en el Anexo B, se muestra un cuadro comparativo de las investigaciones revisadas, y mencionadas en los párrafos anteriores.

### 3.14. Análisis de ciclo de vida (ACV).

Es una herramienta para examinar el impacto ambiental total en un producto, a través de todas sus etapas de vida, desde la “cuna a la tumba”. Determina, de manera cuantitativa, todos los flujos de intercambio entre el sistema-producto, y la ecosfera, en todos los procesos de transformación involucrados (Giudice *et al.*, 2006), como muestra la Figura 3.12. Se han propuesto varias formas de ACV, realizando actualizaciones al método. El último publicado, es la ISO 14040:2006, “Gestión ambiental – Análisis de Ciclo de Vida – Principios y marco de referencia”.

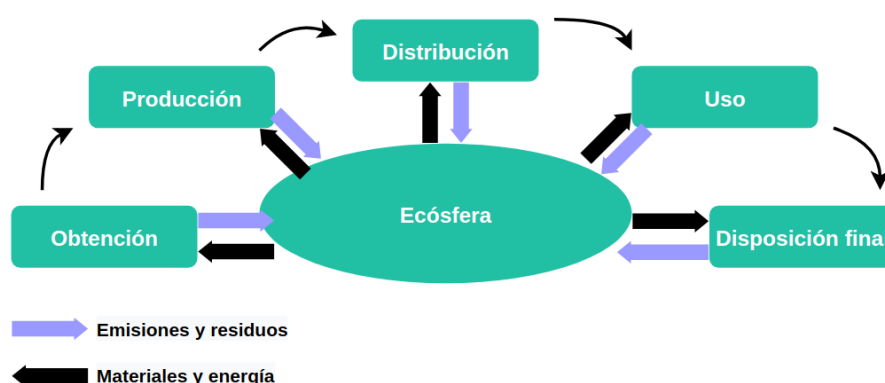


Figura 3.12. Intercambio de materiales, energía, emisiones y residuos entre el ciclo de vida de un producto, y la ecosfera (Graedel, 1998).

Iles advierte que sin sistemas de “rendición de cuentas” hacia los gobiernos, los consumidores, y todos los actores de la cadena de valor de los bioplásticos, es inviable efectuar la verificación acerca de si la empresa en cuestión está reduciendo los impactos adversos del producto, a la vez que se incrementan los beneficios ambientales y sociales a través del I+D, abastecimiento de biomasa, procesamiento y marketing de productos (Iles y Martin, 2012). Usando el Análisis de Ciclo de Vida (ACV), todos los impactos ambientales de la producción de los materiales, hasta el transporte y uso de ellos puede ser analizado (Siti Farah Hanun, *et al.*, 2019).

El desarrollo de un Análisis de Ciclo de Vida resulta particularmente útil, al modelar el proceso de manufactura de productos biocompuestos a partir de residuos, como si fuera una “biorrefinería”, en donde se conciben procesos de recuperación de “nutrientes técnicos”, (o materiales), con integración energética y altamente sustentables (Faúndez, 2019).

Los pasos generalmente acordados para realizar un ACV se describen a continuación, y pueden ser aplicados según Figura 3.13 (Graedel, 1998).

- a) Objetivo y alcance: Se selecciona un producto o actividad, en base a una unidad funcional. Luego, se define el propósito de estudio (comparación, mejora, etc.), y por último se fijan los límites consecuentes.
- b) Análisis de inventarios: Se identifican los inputs y outputs relevantes, los cuales son cuantificados y se adicionan (data en términos de la energía consumida, residuos sólidos y líquidos producidos, cantidad de contaminación atmosférica emitida, etc.).
- c) Análisis de impacto: Se determinan los impactos ambientales y sociales resultantes, en donde la data recopilada es traducida en tasas adicionales de cáncer, muerte de peces, destrucción de hábitats, etc.).
- d) Interpretación: Se aplica el juicio de valor para evaluar o decidir en relación a los objetivos del estudio del paso a).

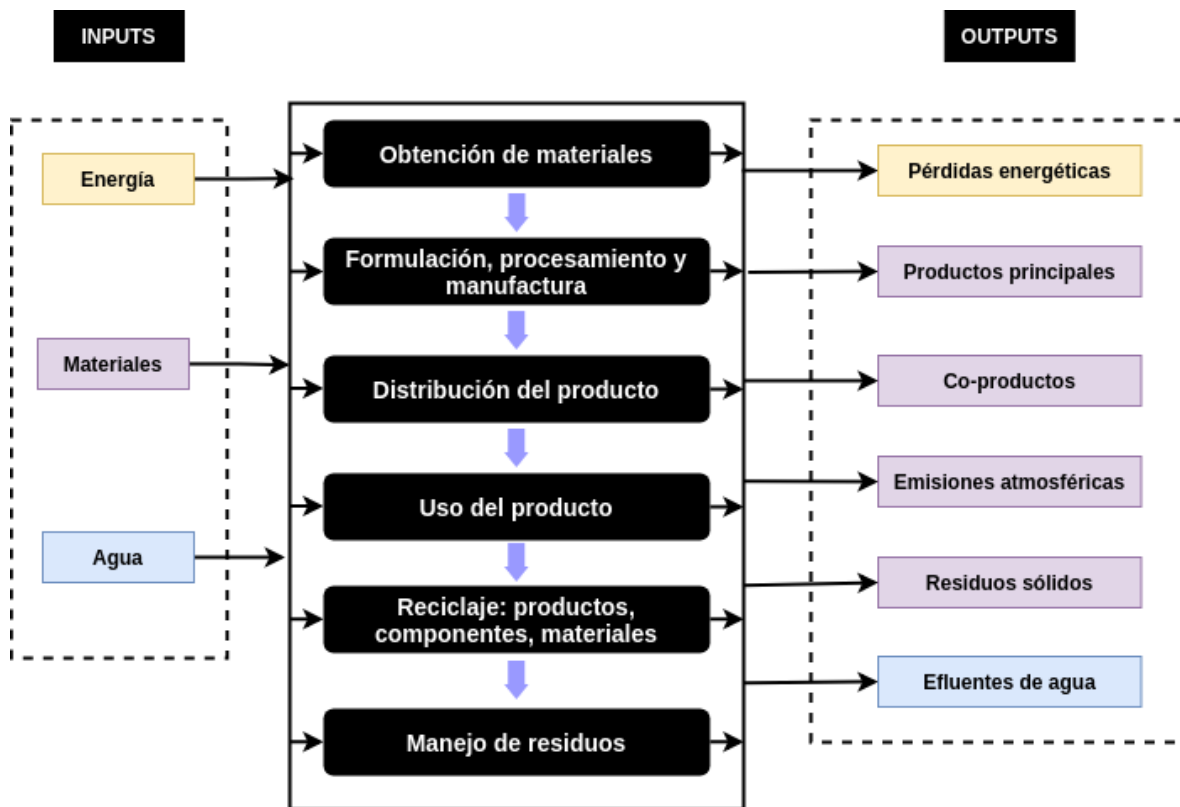


Figura 3.13. Elementos del análisis de Inventario de Ciclo de Vida. En amarillo, los flujos de energía. En morado, los flujos de materiales. En azul los flujos de agua (Graedel, 1998).

## Capítulo 4: Materiales y procedimiento experimental

---

### 4.1. Obtención y caracterización de la materia prima.

La materia prima procesada consiste en tallos de la planta *Cannabis Sativa sp.*, proporcionados por Fundación Daya. En la Figura 4.1 (izquierda) se aprecia el material después de ser desinfectado, secado y trozado. En la misma figura (derecha), el material en formato de “aserrín”, después de ser triturado por un molino de martillos.



Figura 4.1. A la izquierda, tallos de *Cannabis* cortados en trozos de largo aproximado de 3-5 [cm]. A la derecha, aserrín fino de madera de tallo de *Cannabis* con tamaños menores a 1 [mm]. Elaboración propia.

El aserrín expuesto en la Figura 4.2 fue obtenido a partir de un proceso de trituración de los tallos cortados en trozos que muestra la misma figura, con un molino de martillos de 250 W y 1400 RPM, y empleando un tamiz de 1 mm de diámetro de poro en el mismo molino. Dichos tallos trozados no fueron descortezados antes de ser triturados, por lo que el aserrín incluye tanto fibra como madera. Para verificar en qué concentración se encuentran los biopolímeros deseados de lignina y celulosa a partir de los tallos, se realiza una serie de ensayos analíticos, a cargo del Laboratorio de Análisis Químico e Instrumental, del Departamento de Química de la UTFSM Casa Central. A partir de una muestra en polvo de 1 [g] del aserrín expuesto en la Figura 4.1, se realizaron los métodos señalados en la Tabla 7.

Tabla 7. Métodos realizados a la muestra de biomasa lignocelulósica (tallos), para identificar la disponibilidad de los biopolímeros de lignina y celulosa presentes.

| Biopolímero         | Método utilizado                                      |
|---------------------|-------------------------------------------------------|
| <b>Lignina</b>      | ASTM D1106-96 (ASTM, 2013)                            |
|                     | TAPPI 222 (TAPPI, 2006)                               |
| <b>Holocelulosa</b> | ASTM D1104-56 (ASTM, 1978)                            |
| <b>Celulosa</b>     | ASTM D1103-60 (ASTM, 1977)                            |
| <b>Humedad</b>      | Secado a 105 [°C] durante 24 h o hasta peso constante |

Para obtener lignina y celulosa aislada del resto de biopolímeros existente en los tallos iniciales, se procedió en base a lo señalado en las subsecciones siguientes.

#### 4.1.1. Preparación de los tallos.

El procedimiento para preparar los tallos recepcionados, se esquematiza en la Figura 4.2, y consta de 4 pasos principales; el correcto almacenamiento de los tallos, la fermentación microbiológica o “enriado”; el descortezado, y un secado de las sustancias tratadas.

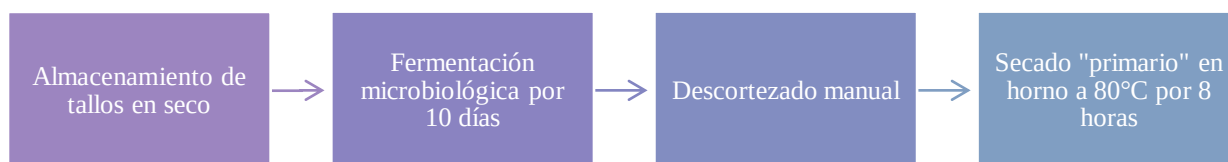


Figura 4.2. Esquema del procedimiento de preparación de las materias primas iniciales (tallos de Cannabis).

Elaboración propia.

Luego de ser recepcionados, los tallos fueron almacenados en un lugar seco (humedad relativa entre 40% y 60%), con especiales precauciones para evitar la aparición de hongos patógenos, como el oídio. Para prevenir la aparición de este hongo, se roció el material, en primera instancia, con el fungicida para Oídio marca Anasac, siguiendo las instrucciones de uso del mismo envase. Además, se procuró tener un sistema de renovación de aire que impidiera que este elemento se estanque. Por último, ante la aparición de oídio, se descartó inmediatamente el material contaminado.

El siguiente paso es la fermentación microbiológica, o también nombrado como “enriado”, el cual consistió en sumergir los tallos en agua desmineralizada por 10 días, a temperatura

ambiente, revolviendo la solución cada 24 horas. Posteriormente, se procedió a la separación manual entre la fibra y la madera (descortezado), proceso realizado manualmente. El material obtenido en el proceso anterior es secado en estufa por 8 horas, a 80 °C. Para garantizar que el secado fuese lo más homogéneo posible, se agitó y removió el material cada 1 hora. De esta etapa se obtuvo, por separado, fibras y madera seca en troncos pequeños de un largo aproximado de 10 centímetros.

#### 4.1.2. Obtención de lignina.

El procedimiento empleado en este trabajo para la obtención de la lignina es el de deslignificación alcalina por soda (empleando hidróxido de sodio). El esquema general del procedimiento de obtención de lignina se presenta en la Figura 4.3, y se describe a continuación. Comienza a partir de la obtención de los troncos de madera seca conseguidos en el ítem 4.1.1.

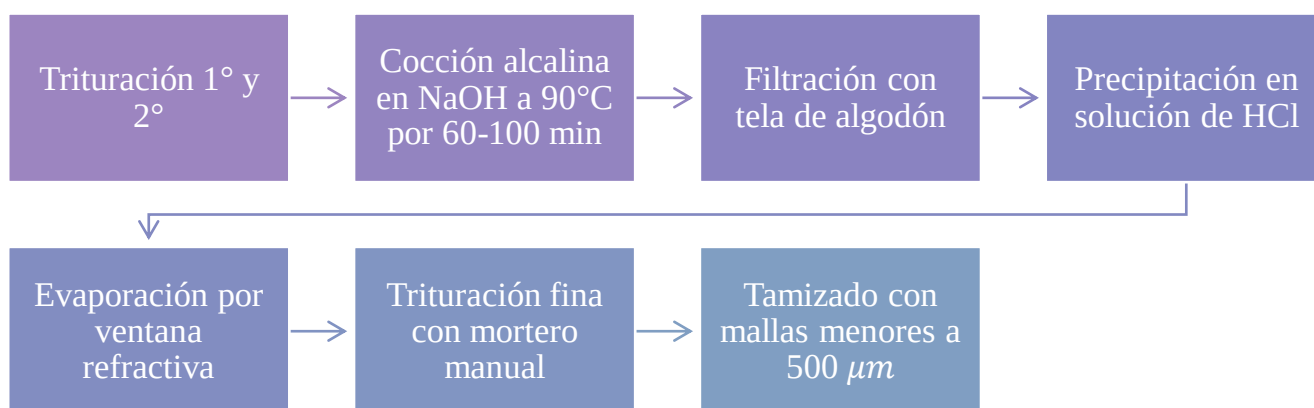


Figura 4.3. Esquema del procedimiento de obtención de lignina a partir de troncos de madera seca de tallos de Cannabis.

- **Trituración primaria y secundaria**

Una vez preparada la materia prima inicial (tallos), y separada la fibra de los troncos de madera seca, se realizó la trituration primaria de las astillas leñosas, que consiste en una reducción del tamaño de partícula, a través de un molino de cuchillas de eje vertical (proporcionado por el Laboratorio de Operaciones Unitarias, IQA, UTFSM). Se introdujeron trozos de madera seca de unos 15 [cm] de largo, para obtener un aserrín de unos 3 [cm] de largo estimado. Luego, se procede a una segunda etapa de trituración, en la cual se emplea un molino de martillos de 250 W y 1400 RPM (facilitado por las dependencias de Labsun, expuesto en Figura 4.4) para reducir el tamaño de partícula del aserrín obtenido en la trituración primaria. De este proceso, se obtiene un polvo fino menor a 1 [mm] de diámetro promedio de partícula, gracias al uso de un tamiz inserto en el molino de martillos (ver Figura 5.1).



Figura 4.4. Lignina en “escamas”, obtenida luego de evaporación por ventana refractaria. Elaboración propia

- **Cocción alcalina**

El siguiente paso tiene una gran importancia dentro del proceso global, dada la complejidad a operar con los parámetros óptimos de fraccionamiento de biomasa, y comprendiendo un factor crítico como lo es el bajo rendimiento de extracción de lignina a partir de la materia prima (equivalente al 1,3%). Este proceso tiene como nombre “cocción alcalina”, en donde se sumergió el polvo fino de madera en una solución de hidróxido de sodio (NaOH) al 2% (0,5 [M]) en baño termostático de 8L de capacidad, a 90°C, durante un tiempo entre 60 y 100 minutos. Para ello, se usaron 6 jarros conserveros de 1 [L] cada uno. Se utilizaron 300 [g] de polvo fino, para obtener 3,9 [g] de lignina seca luego del proceso de evaporación por ventana refractaria. El resultado de este proceso, es un licor negro rico en lignina, y como subproducto, una pasta con alto contenido de celulosa y otros compuestos.

- **Filtración**

Consiste en la separación del licor negro de los restos del polvo fino (celulosa, hemicelulosa, azúcares y otros compuestos). Se criba la solución a través de una tela de algodón, para dejar escurrir el licor negro junto con agua, y retener la pulpa seca sin lignina. Finalmente, se obtiene el licor negro con alto contenido de lignina, aislado de coloides perceptibles al ojo del humano.

- **Precipitación**

A partir del licor negro obtenido, se efectúa una precipitación de lignina variando el pH de la solución, con ácido clorhídrico (HCl) 0,5 [M] al 32%. Los mejores rendimientos se obtuvieron al llegar a un pH 3-4. Para aumentar la velocidad de precipitación por gravedad, se enfrió la solución a unos 3 °C, por 8 horas. El resultado, es una solución con lignina aglomerada y concentrada al fondo de cada recipiente, y un sobrenadante ácido como co-producto.

- **Evaporación**

Consiste en un secado por ventana refractiva, en donde se separa el agua de la lignina precipitada a través de su evaporación. En un baño termorregulado, se insertó una “cama” de una superficie de 25x15 [cm], construida en “mylar”, un material que resiste a altas temperaturas (suministrado por el Laboratorio de Alimentos, IQA, UTFSM Casa Central). Dentro de ella, se inserta el concentrado de lignina. La temperatura del agua se fija a 90°C, y el proceso de evaporación demora entre 10 a 20 minutos. Luego, se frotó una espátula sobre la lignina seca y adherida al plástico, para obtener entonces, lignina seca y en escamas. El resultado se muestra en la Figura 4.5.



Figura 4.5. Lignina en “escamas”, obtenida luego de evaporación por ventana refractiva. Elaboración propia.

- **Trituración final**

Con un mortero manual cerámico, se trituran las escamas de lignina conseguidas, para obtener un polvo fino con un tamaño de partícula menor a 1 [mm].

- **Tamizado**

Para obtener un polvo fino con tamaño de partícula menor a 500 [ $\mu\text{m}$ ], se utilizó un tamizador RETSCH AS200 con una amplitud de 2 [mm/g], en el laboratorio de Laboratorio de Metalurgia Extractiva, del Departamento de Ingeniería Metalúrgica y de Materiales UTFSM. La muestra obtenida se aprecia en la Figura 5.1 (polvo fino). La distribución granulométrica obtenida se muestra en la Tabla 11, y Figura G.2.

#### **4.1.3. Obtención y tratamiento superficial de celulosa.**

Para obtener celulosa en polvo fino a partir de las fibras procesadas según el ítem 4.1.1, se procede en base a 4 pasos; trituración, tratamiento alcalino de las fibras, secado y tamizado. Las

fibras son trituradas con un molino de martillos (dispuestos en las instalaciones de Labsun) para obtener fibras con longitudes menores a 1 [cm]. Luego, en el Laboratorio de Nanobiomateriales (Física UTFSM), se realiza un tratamiento superficial, el cual consiste en lavado alcalino de las fibras. Se sumergen en solución de NaOH (5% p/p) a temperatura ambiente, con una relación de solución/fibra equivalente a 20/1 en peso, por 30 minutos. Luego, la solución se lava con agua desmineralizada para eliminar trazas alcalinas. Se neutraliza con solución de ácido acético al 1% p/p. Posteriormente, se efectúa un secado, donde las fibras se secan en una estufa a 80°C por 48 horas. Se revuelven las fibras cada 6 horas para conseguir una evaporación homogénea de agua.

Para la separación granulométrica (tamizado) de la celulosa obtenida, se utiliza un tamizador RETSCH AS200, del Laboratorio de Metalurgia Extractiva del Departamento de Ingeniería Metalúrgica y de materiales UTFSM., con una amplitud 2 [mm/g], para obtener un polvo fino con tamaño de partícula menor a 500 [ $\mu m$ ]. La muestra obtenida se aprecia en la Figura 4.8 (polvo fino de fibras). Cabe señalar la presencia de altas fuerzas cohesivas en el material que dificultan la sedimentación en el tamizador (ver Figura 5.2). Los datos tomados a partir de la separación granulométrica, se muestran en la Tabla 11 y Figura G.1.

La agitación se realiza por un tiempo de 10 [min]. Luego de esto se realiza un pesaje de las particular retenidas en cada fracción de tamaño ( $F_a$ ). Con esto, se determina el porcentaje acumulado sobre la malla para cada tamiz ( $F_u$ ), que corresponde a la cantidad de material que atraviesa la malla.

Los resultados obtenidos mediante el tamizaje se presentan en la Tabla 11. La caracterización de los biopolímeros se representa mediante las curvas granulométricas (Figura G.1, Figura G.2), que representan el porcentaje acumulado en cada malla. Se señala, que una pequeña fracción de cada tipo de biopolímero no logra atravesar la malla de 1000 [ $\mu m$ ].

#### **4.2. Diseño de experimentos.**

El objetivo general de la investigación radica en diseñar y elaborar prototipos de un material biocompuesto, utilizando ácido poliláctico (PLA) comercial como matriz, y biopolímeros obtenidos de biomasa forestal como refuerzo. Para evaluar la capacidad de refuerzo de dichos biopolímeros, se determina diseñar las muestras en función la resistencia a la tracción, y del módulo específico (módulo de elasticidad sobre la densidad). En base a la bibliografía revisada en las secciones 3.9 y 3.12, se identifica que al emplear ciertas concentraciones de lignina, fibras de celulosa, y PEG 400 en una matriz de PLA, se consigue aumentar tanto la resistencia a la tracción, como el módulo específico y la ductilidad. Por ello, y para esta investigación, los

factores escogidos son las concentraciones de celulosa, lignina y PEG 400 (en % p/p). La variable de respuesta consiste en el módulo específico  $\left[\frac{E}{\rho}\right]$  de cada muestra.

Se diseñan 8 muestras, con 2 corridas distintas. La primera corrida considera 4 muestras con PEG 400. La segunda, considera 4 muestras sin dicho compuesto. Los factores de diseño (concentración de biopolímeros en %p/p), los niveles y rangos se muestran en la Tabla 8.

Las concentraciones definidas para la utilización de lignina, fibras de celulosa y PEG 400, se obtienen a partir de la bibliografía examinada en las secciones 3.9 y 3.12. Se determina un rango óptimo entre 15 y 30 %p/p para el uso de fibras; entre un 10 y 15%p/p para el uso de lignina, y un valor de 10%p/p para el PEG 400. La definición de %p/p se muestra en la Ecuación 11, en donde  $m_{soluta}$  es la masa del material en cuestión, y  $m_{solución}$  es la masa del material en cuestión más la masa de la matriz:

$$\%p/p = \frac{m_{soluta}}{m_{solucion}} * 100 \quad (11)$$

Tabla 8. Diseño de experimentos para el prototipado del material compuesto.

| Muestra   | PEG 400<br>%p/p | Lignina<br>%p/p | Fibra<br>%p/p | PLA<br>%p/p |
|-----------|-----------------|-----------------|---------------|-------------|
| L10F15    | 0               | 10              | 15            | 75          |
| L10F30    | 0               | 10              | 30            | 60          |
| L15F15    | 0               | 15              | 15            | 70          |
| L15F30    | 0               | 15              | 30            | 55          |
| P10L10F15 | 10              | 10              | 15            | 65          |
| P10L10F30 | 10              | 10              | 30            | 50          |
| P10L15F15 | 10              | 15              | 15            | 60          |
| P10L15F30 | 10              | 15              | 30            | 45          |

### 4.3. Preparación de las muestras.

Una vez obtenidos los biopolímeros de lignina y celulosa en polvo, se procedió a fabricar los prototipos del material biocompuesto. El procedimiento efectuado para el conformado por solución de las muestras, se explica en el esquema de la Figura 4.6.

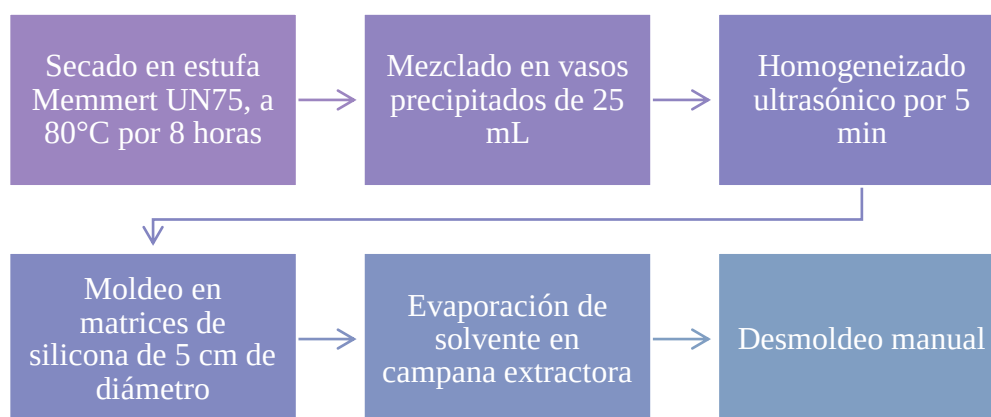


Figura 4.6. Esquema de preparación de las muestras a través del procedimiento de conformado por solución.

Este proceso de manufactura, empleó como ácido poliláctico (PLA) como material para la matriz, manufacturado por la empresa Nature Works. Su nombre comercial es "INGEO Biopolymer 4032D". Son suministrados por el Laboratorio de Nanobiomateriales, del Departamento de Física UTFSM. La ficha técnica del material se muestra en la Tabla 5. Para la elaboración de las probetas, se utilizó el método de conformado por solución. Para ello, los pellets de PLA se disolvieron en cloroformo antes de mezclarse con los biopolímeros de relleno, conformando una solución con una densidad equivalente a 8 gramos de soluto por cada 100 ml de dicho compuesto químico.

Como material de relleno, se emplean tanto las fibras de celulosa obtenidas según lo esquematizado en la sección 4.1.3, como la lignina soda proveniente del proceso detallado en la sección 4.1.2.

Para la obtención de las 8 muestras mediante el proceso de conformado por solución, fueron utilizados 3,6 [g] de fibras, con una granulometría menor a 500 [ $\mu\text{m}$ ]. Su aspecto, se aprecia en la Figura 4.8 (a). Además, se utiliza un total de 2 [g] de lignina soda en polvo (Figura 4.8 (b)), y también con un tamaño de partícula < 500 [ $\mu\text{m}$ ]. Por otra parte, para mejorar las propiedades del compuesto se emplea el aditivo PEG 400 fabricado por Merck, suministrado por el Centro de Biotecnología UTFSM (CBDAL UTFSM), el cual tiene la función de "plastificante" para la mitad de las muestras (Masirek *et al.*, 2007).

Las probetas se realizaron en el laboratorio de nanobiomateriales, del Departamento de Física de la Universidad Técnica Federico Santa María, Casa Central. Todos los materiales, equipos e implementos fueron suministrados por dicho laboratorio, a excepción de la celulosa y lignina (ambas obtenidas a partir de Labsun), y el PEG 400 (obtenido en CBDAL UTFSM CC). El método de elaboración, para las 8 muestras señaladas en la Tabla 8, describe en los siguientes pasos:

- **Secado en estufa**

Se introducen los materiales de celulosa y lignina en polvo en una estufa Memmert UN75, a 80°C por 8 horas. El propósito de este paso, es eliminar la humedad presente en el material y no afectar la medición de masa.

- **Mezclado**

En base a la Tabla 8, se miden las cantidades requeridas de masa de cada material, mediante una balanza digital marca Jadever, de resolución 0,05 [g]. Luego, se incorporan los biopolímeros en 8 vasos precipitados de 25 [mL], constituyendo una solución de lignina, celulosa, PLA y PEG 400 disueltos en cloroformo (con una densidad inicial de 8 [g] de PLA por cada 100 [mL] de cloroformo). Para lo anterior, se utiliza una micropipeta de volumen variable VMTECH con rango entre 1000-5000 [ $\mu$ L]. Cada mezcla tiene un valor total de masa sólida equivalente a 2 [g].

- **Sonicación**

La muestra fue homogeneizada usando un Homogeneizador ultrasónico marca Cole Parmer de 750 W. Para evitar el aumento de temperatura, el proceso fue llevado a cabo en un baño de hielo para así evitar que el cloroformo volatilice. El ciclo de operación, consiste en entregar energía a la solución cada 15 segundos, con lapsos de 5 segundos de pausa, durante 5 minutos. Además, se trabaja con un movimiento giratorio de la mesa en la que se encuentra el vaso precipitado. El resultado final se muestra en la Figura 4.7.

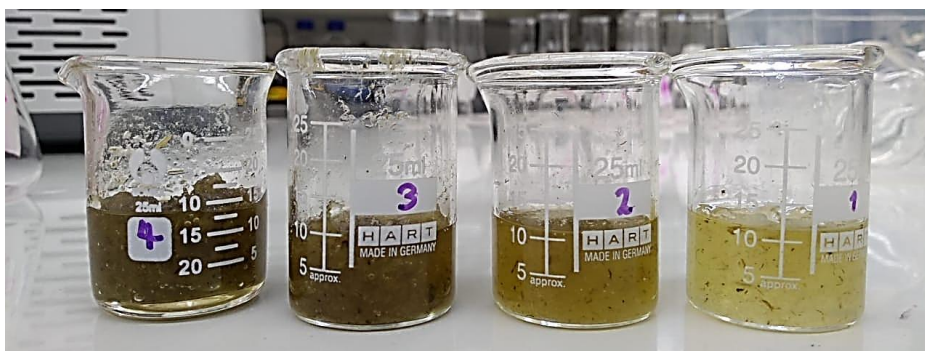


Figura 4.7. Mezclas sonicadas de lignina y fibras de celulosa, en 4 distintas concentraciones, inmersas en solución de PLA disuelto en cloroformo.

- **Moldeo**

Luego de homogenizar las mezclas, se vierten en moldes de silicona con sección interior circular, de un diámetro interno de 5 [cm].

- **Evaporación del solvente**

Cada muestra se mantiene en una campana de extracción de gases de sobremesa de 1 metro, por 8 horas, para que el proceso de evaporación del solvente se desarrolle sin implicar riesgos humanos. A las 4 horas, se volteó cada probeta dentro del molde, para favorecer una evaporación homogénea. El proceso fue desarrollado sin sistema de compactación de secado de las mezclas, y con variaciones ambientales no controladas en el flujo de aire de extracción.

- **Desmoldeo**

Luego de ser evaporado el solvente en cada probeta, se retira el molde de forma manual. El resultado final de las muestras se muestra en la Tabla 12.

#### **4.4. Caracterización mecánica de las muestras.**

A partir de las 8 muestras obtenidas, se realiza un ensayo de microtensión en el Laboratorio de Biomecánica y Biomateriales, del Departamento de Mecánica de la Universidad de Santiago de Chile. El propósito es medir la resistencia a la tracción (y el módulo de elasticidad) para las direcciones vertical y horizontal.

El ensayo de tracción se realiza en una máquina universal Instron, la cual permite fijar las probetas en mordazas de acero inoxidable, sometidas a una celda de carga de 50 [N] en la parte superior de la máquina. La velocidad de las mordazas va entre los 0,4 a los 0,7 [mm/mm], y la carga máxima y efectiva aplicada es de 21 [N]. En el Anexo F se muestra una tabla con las dimensiones de cada probeta.

A partir de los discos originales elaborados, se cortaron 32 láminas de 20x5 [mm], con un espesor entre 0,9-3 [mm]. Las probetas utilizadas en cada muestra fueron cortadas en dos direcciones: horizontal (H1 y H2) y vertical (V1 y V2), completando de esta manera los 4 especímenes por muestra, como se observa en los cuadros rojos en la Figura 4.8. Se realizaron 4 ensayos (repeticiones) por muestra, a excepción de las muestras PEG10F15 y PEG10F30.

Para cada muestra, se obtienen los valores de la resistencia a la tracción, expuestos en las curvas de las Figuras 5.4 y 5.5. A partir de estas curvas, se obtienen los valores del módulo elástico, y se calcula el módulo específico. Dichos valores se muestran en la Tabla 14.

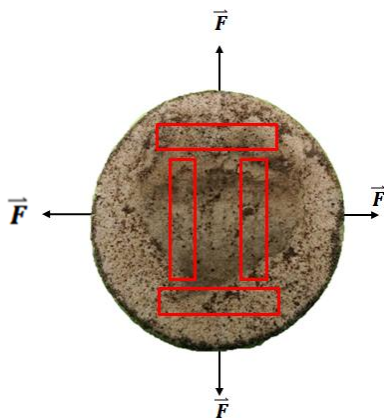


Figura 4.8. Esquematización de especímenes obtenidos para cada muestra.

#### 4.5. Análisis del Ciclo de vida del material y sus costos.

Se efectuó un Análisis de Ciclo de Vida, en base al estudio realizado por (Nicollier, 2001), en donde se examinó el impacto ambiental del ciclo de vida de pallets de carga, para distintos materiales (Polipropileno con fibra de vidrio, y polipropileno con fibra “reed”). En la Tabla 9 se observa el Objetivo y alcance del estudio. El análisis de costos se efectúa en base a la formulación L15F30.

Tabla 9. Objetivo y alcance del Análisis de Ciclo de Vida realizado.

|                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Objetivo             | Evaluar ACV integrando obtención de materias primas y producción de Cannaplast L15F30 (“cradle-to-gate”), comparando consumo energético y emisión de gases de efecto invernadero (emisiones de $CO_2$ equivalentes) con polipropileno con fibra de vidrio, y polipropileno con fibra “reed”.                                                                                                                                                                                                     |
| Aplicación           | La investigación significa una fuente de datos relevante al momento de decidir sobre una posible inversión de recursos para continuar la investigación (en cuanto a protección intelectual, búsqueda de oportunidades rentables, entre otras).                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Unidad funcional     | Una unidad de pallet (11,8 [kg]) del material compuesto.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Bordes de sistema    | Se incluye la obtención de materias primas, y la manufactura del producto (“cradle-to-gate”). No se incorpora la medición de flujos de agua, ni de gases de manera directa.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Calidad de los datos | La gran mayoría de los datos asociados a Cannaplast L15F30, fueron recopilados de manera experimental en el proceso de investigación y prototipado del mismo material. Baja cantidad de réplicas para la obtención de algunos datos, conlleva un bajo nivel de reproducibilidad y repetibilidad de resultados. Datos asociados a PP, fibras de vidrio, y fibras naturales de “reed”, fueron obtenidos a partir de investigaciones (Nicollier. <i>et al.</i> , 2001), y manuales gubernamentales. |

#### 4.5.1. Análisis de Inventario (LCI en inglés).

Se identifican los inputs y outputs relevantes, a través del análisis del cultivo de las materias primas del material compuesto, hasta la fabricación (cradle-to-gate), como lo muestra la Figura 4.9. Se aclara, que no se incluye el análisis directo de flujos de agua, ni de gases. A la vez, se consideran despreciables los aportes energéticos asociados a algunos insumos, como biofertilizantes utilizados para el cultivo de la planta. Los flujos considerados en los cálculos, se muestran en la Tabla 22.

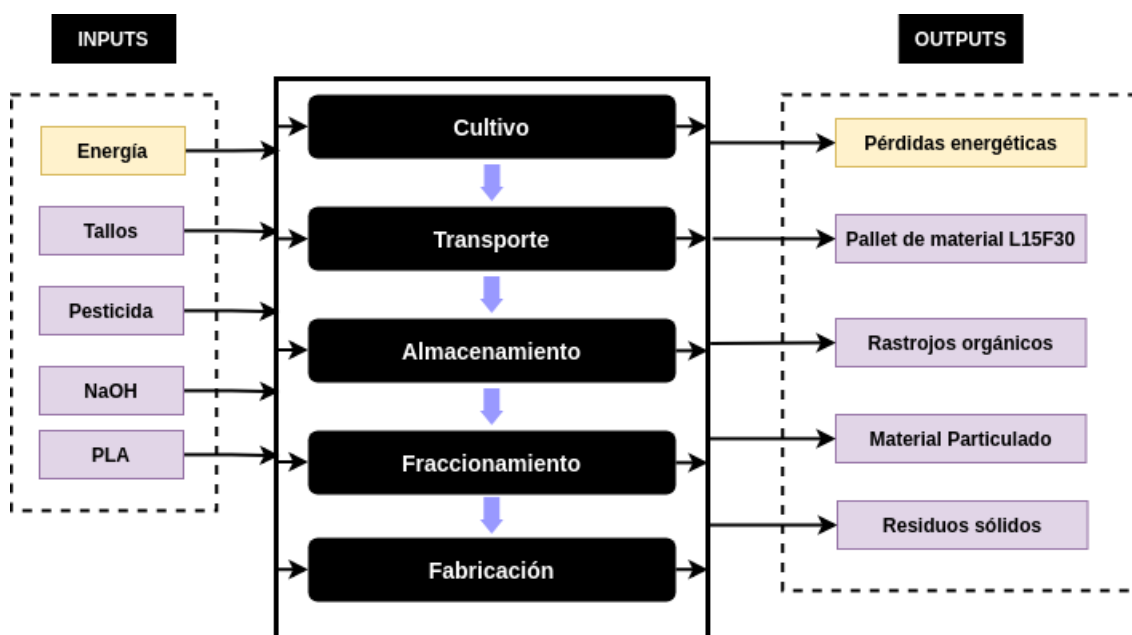


Figura 4.9. Esquema metodológico del Análisis de Inventarios aplicado al proceso estudiado, en base a (Graedel, 1998), incluyendo el análisis desde el cultivo, hasta la manufactura (“cradle-to-gate”), y considerando los materiales (en morado) y energía (en amarillo) que fluyen a través de cada proceso.

#### 4.5.2. Análisis de Impacto Ambiental (LCAI en inglés)

A partir del consumo energético de cada proceso, se evaluará la equivalencia en emanación de gases de efecto invernadero, a través del  $CO_{2eq}$ , obtenido a través de la plataforma [ceroco2.org](http://ceroco2.org).

#### 4.5.3. Interpretación.

Se realiza la comparación de consumo energético y emisión de gases de efecto invernadero para los tres materiales compuestos.

## Capítulo 5: Resultados y Análisis

### 5.1. Caracterización materia prima.

En la Tabla 10 se muestran los resultados del análisis bioquímico realizado al aserrín en polvo de tallos de Cannabis, por el Laboratorio de Análisis Químico e Instrumental, del Departamento de Química UTFSM.

Tabla 10. Resultados de análisis bioquímico para muestra de tallos de Cannabis\*.

| Análisis       | Unidad                                   | Valor          |
|----------------|------------------------------------------|----------------|
| Lignina        | [g Lignina / 100 g de muestra seca]      | $25 \pm 1$     |
| Holocelulosa** | [g Holocelulosa / 100 g de muestra seca] | $80 \pm 1$     |
| Celulosa       | [g Celulosa / 100 g de muestra seca]     | $41,6 \pm 0,4$ |
| Humedad        | [g agua / 100 g de muestra seca]         | $11,8 \pm 0,2$ |

\* Los resultados se expresan con el siguiente formato;  $X \pm s$ ; donde X corresponde al valor promedio entre las porciones de muestra analizadas y s es la desviación estándar de los valores obtenidos.

\*\* El porcentaje de Holocelulosa corresponde al porcentaje de celulosa + porcentaje de Hemicelulosa.

Los resultados del análisis bioquímico de la muestra de aserrín de los tallos, muestran distintos valores respecto a bibliografía revisada. En Anexo A, Tabla 26, se muestra que el porcentaje de biodisponibilidad de celulosa y lignina es de 17,9-22,4% y 3,7-5,7% respectivamente, en tallos de cáñamo. Se subraya la diferencia bioquímica entre tallos de cannabis (utilizados en esta investigación, y obtenidos a partir de cultivos industriales con fines medicinales), de los tallos de cáñamo, cuyo objetivo de cultivo se asocia a otros sectores industriales.

Luego de fraccionar los tallos, y la madera y fibra por separado, se obtiene lignina y fibras de celulosa en polvo, como se aprecia en la Figura 5.1 Dichos biopolímeros son clasificados según su granulometría. La distribución del tamaño de partículas se observa en la Tabla 11, y en las Figuras G.1 y G.2, abarcando una masa inicial de 6,1 [g] de fibras, y de 11,7 [g] de lignina.



(a)



(b)

Figura 5.1. (a) Fibras de celulosa obtenidas a partir del fraccionamiento de tallos de Cannabis. (b) Muestra de lignina soda, seca y en polvo, obtenida a partir del fraccionamiento de tallos de Cannabis. Elaboración propia.

Tabla 11. Tablas de granulometría asociadas a la tamización de los biopolímeros de lignina y celulosa.

| Malla<br>[ $\mu\text{m}$ ] | Fibras de celulosa |           |           | Lignina   |           |           |
|----------------------------|--------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                            | $F_a$ [g]          | $F_u$ [g] | $F_u$ [%] | $F_a$ [g] | $F_u$ [g] | $F_u$ [%] |
| 1000                       | 0,4                | 5,7       | 93,4      | 0,2       | 11,5      | 98,3      |
| 500                        | 0,7                | 5         | 82,0      | 0,9       | 10,6      | 90,6      |
| 250                        | 1,5                | 3,5       | 57,4      | 2,3       | 8,3       | 70,9      |
| 125                        | 1,2                | 2,3       | 37,7      | 4,6       | 3,7       | 31,6      |
| 75                         | 0,8                | 1,5       | 24,6      | 2,7       | 1         | 8,5       |

Se recalca la presencia de altas fuerzas cohesivas en el material obtenido de fibras de celulosa, al momento de tamizar. Este fenómeno aumenta la dificultad de realizar una comparación con otros experimentos de tamizado del mismo material. Se observa en la Figura 5.2 un grupo de fibras que persisten en el primer nivel de la torre de tamices. Sin embargo, si se observa la distribución del tamaño de partículas de la Tabla 39, atribuida a un material revisado en bibliografía de aserrín de madera de pino, se constata que no se acumula material en el primer tamiz de 600 [ $\mu\text{m}$ ]. A diferencia de la lignina y fibra de celulosa trabajadas en la presente investigación, en donde se acumuló un 6,6% y un 1,7% respectivamente, en la primera malla. En el caso de la lignina, aquello se atribuye a la presencia de ciertas partículas con tamaños mayores a 1000 [ $\mu\text{m}$ ] (contaminación de la muestra con gránulos indeseados de otro material). Sin embargo, en el caso de la fibra de celulosa, se atribuye esta situación a las altas fuerzas cohesivas entre ellas, como se mencionó previamente.



Figura 5.2. *Fibras de celulosa retenidas por la malla superior en el proceso de tamizado. Elaboración propia.*

## 5.2. Muestras obtenidas y sus propiedades mecánicas.

Las 8 muestras elaboradas y descritas en la sección 4.3, son expuestas en la Tabla 12. Si bien se incluyen partículas y fibras cortas de celulosa aleatoriamente dispersadas en la matriz, se entenderá todo material de relleno como partícula, tanto a la celulosa como a la lignina.

Tabla 12. Resultados obtenidos a partir de la elaboración de probetas del material compuesto.

| Sin PEG                                                                                           | Con PEG                                                                                               |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  <p>L10F15</p> |  <p>P10L10F15</p> |



L10F30



P10L10F30



L15F15



P10L15F15



L15F30



P10L15F30

Las muestras obtenidas se ordenan en base al siguiente código: “PXXLYYFZZ”, en donde los tres primeros dígitos hacen referencia al %p/p de PEG 400. Los dígitos “LYY” hacen referencia al %p/p de lignina como relleno, y los dígitos “FZZ” hacen referencia al %p/p de fibra de celulosa como relleno. Si en el código de una probeta no aparece uno de estos términos, se

entiende que el %p/p equivale a 0. En la Tabla 13 se muestran las propiedades físicas y mecánicas de las 8 probetas obtenidas

Tabla 13. Propiedades teóricas y concentraciones en % p/p de las probetas obtenidas. Se destaca en rojo la muestra con el mayor módulo de rigidez específica.

| Código    | Lignina<br>%p/p | Fibra<br>%p/p | PLA<br>%p/p | PEG 400<br>%p/p | $\rho_c$<br>g/ml | $E_{sup}$<br>GPa | $E_{inf}$<br>GPa | $E_{esp}$<br>GPa |
|-----------|-----------------|---------------|-------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| L10F15    | 10              | 15            | 75          | 0               | 1,45             | 11,32            | 4,06             | 5,29             |
| L10F30    | 10              | 30            | 60          | 0               | 1,62             | 15,92            | 4,61             | 6,33             |
| L15F15    | 15              | 15            | 70          | 0               | 1,51             | 13,04            | 4,23             | 5,73             |
| L15F30    | 15              | 30            | 55          | 0               | 1,69             | 17,66            | 4,87             | 6,68             |
| P10L10F15 | 10              | 15            | 65          | 10              | 1,64             | 14,99            | 4,44             | 5,91             |
| P10L10F30 | 10              | 30            | 50          | 10              | 1,91             | 19,59            | 5,20             | 6,49             |
| P10L15F15 | 15              | 15            | 60          | 10              | 1,72             | 16,68            | 4,67             | 6,19             |
| P10L15F30 | 15              | 30            | 45          | 10              | 2,02             | 21,31            | 5,57             | 6,66             |

A partir de la Tabla 13, se observa que la probeta L15F30 es la que posee un módulo específico teórico más alto. Por ello, se selecciona como la probeta con la que se efectuará el diagrama de flujo, la evaluación de costos, y el ACV. Esta muestra, se expone en la Tabla 12. Se atestigua que esta muestra es la que tiene mayor concentración de lignina y fibra de celulosa, demostrando un buen resultado sinérgico entre las propiedades mecánicas de la mezcla.

En la Figura 5.3 se grafica el módulo de elasticidad (teórico) superior e inferior, versus la densidad del compuesto. Se recalca que el módulo de elasticidad experimental, debería ubicarse entre el módulo de elasticidad inferior y superior (teórico), según Callister. Para comprobar lo anterior, se analizan los datos obtenidos para cada probeta en el ensayo de tracción, con el objetivo de determinar el módulo específico de cada muestra, y compararla con los valores teóricos calculados.

En la Figura 5.4 (muestras verticales) y 5.5 (muestras horizontales) se muestran los resultados de las probetas ensayadas. Además, en el Anexo F se muestran las propiedades físicas y dimensiones de las probetas ensayadas.

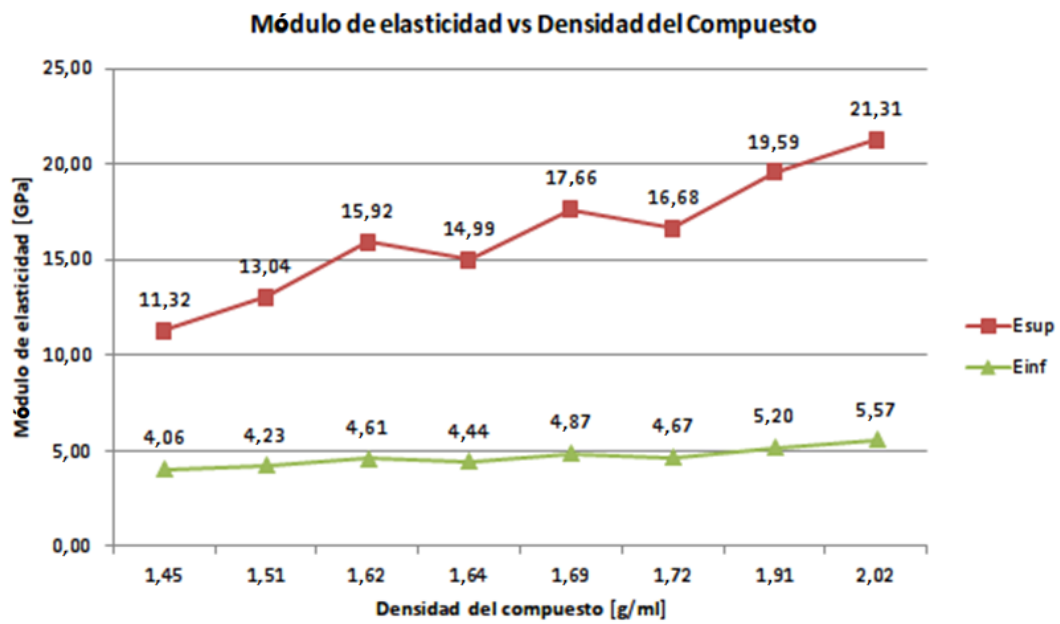


Figura 5.3. Módulo de elasticidad versus densidad del material compuesto. La línea roja indica módulo de rigidez superior, y línea verde indica módulo de rigidez inferior. Elaboración propia.

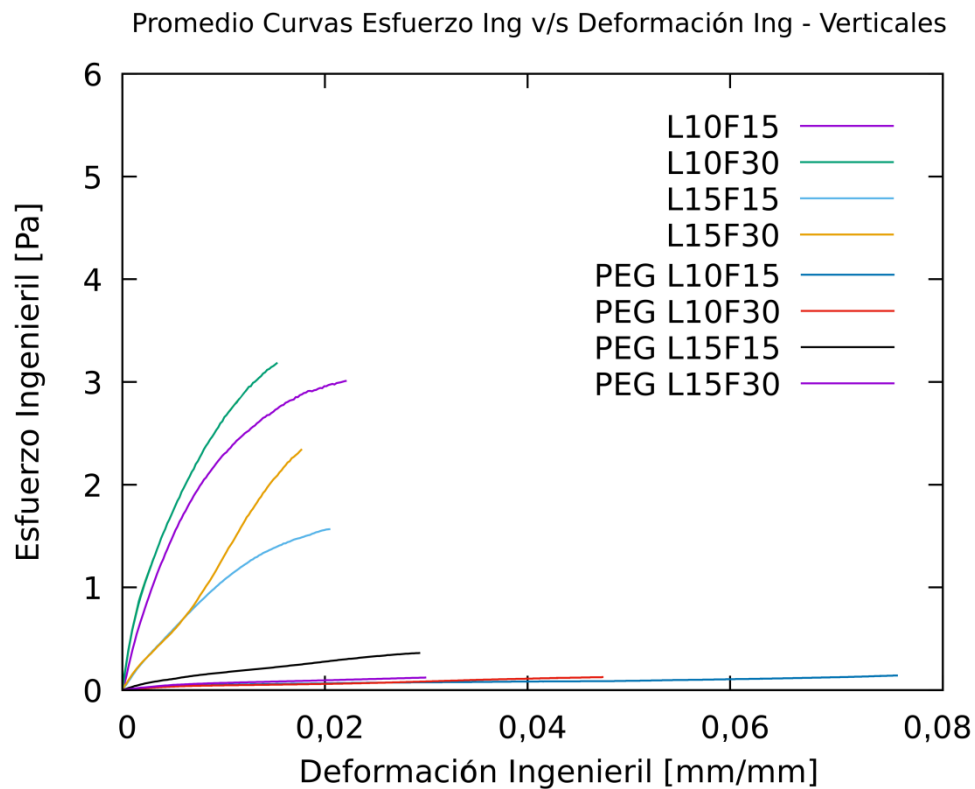


Figura 5.4. Curvas de resultados obtenidos a partir de ensayo de tracción para probetas verticales (imagen y resultados proporcionados por Laboratorio de Biomecánica y Biomateriales USACH).

En la Figura 5.4, se muestran las curvas de esfuerzo-deformación para las probetas verticales del ensayo de tracción. Las muestras que se destacan por su elevado módulo de elasticidad y resistencia a la tracción, se acotan a la muestra L10F30 y L10F15 (ambas sin PEG). Por otro lado, todas las curvas asociadas a las muestras con PEG tienen un módulo elástico y resistencia a la tracción muy bajo.

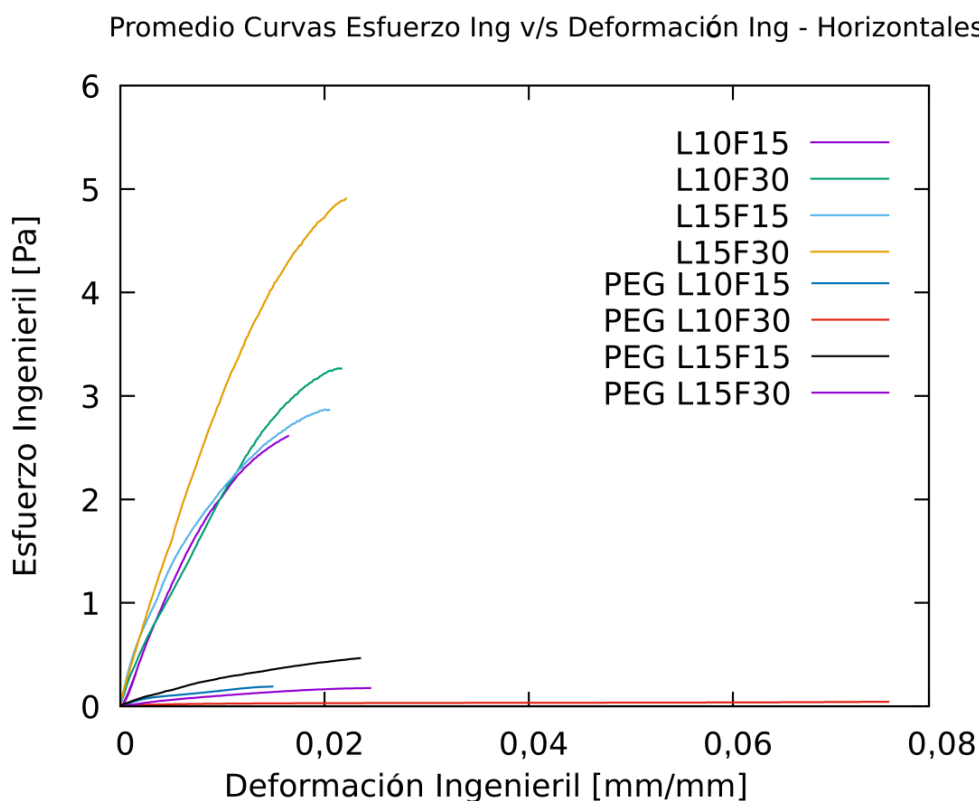


Figura 5.5. Curvas de resultados obtenidos a partir de ensayo de tracción para probetas horizontales (imagen y resultados proporcionados por Laboratorio de Biomecánica y Biomateriales USACH).

En la Figura 5.5, se muestran las curvas de las probetas testeadas en el eje horizontal de los discos originales. Se destacan las curvas asociadas a las muestras L15F15 y L15F30, como las que muestran el mayor módulo elástico, a pesar de que la muestra L15F30 presente la mayor resistencia a la tracción.

En la Tabla 14 se muestran las propiedades obtenidas de manera experimental para cada muestra, incluyendo la densidad del compuesto, el módulo elástico horizontal, vertical y promedio, el módulo específico, y la resistencia a la tracción horizontal, vertical y promedio.

Se selecciona la muestra L15F30 para los cálculos posteriores (ACV y costos), a pesar de que el valor del módulo específico mayor fue obtenido por la muestra L15F15. Por otro lado, el mayor valor obtenido para la resistencia promedio a la tracción, fue también la muestra L15F30. Se

destacan en rojo las propiedades de dichas muestras. Se evidencia que la aplicación de PEG disminuye los valores de los módulos específicos, y la resistencia a la tracción. A partir de los datos expuestos en la Tabla 14, se determina la cualidad anisotrópica del material; los valores obtenidos del módulo específico y de la resistencia a la tracción son mayores para los ensayos efectuados a las probetas en la sección horizontal.

Tabla 14. Propiedades y valores del módulo específico para las probetas ensayadas (elaboración propia).

| Muestra   | Experimental       |                |                |                     |                    |                    |                    |                         |
|-----------|--------------------|----------------|----------------|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------------|
|           | $\rho_c$<br>[g/ml] | $E_v$<br>[GPa] | $E_h$<br>[GPa] | $E_{prom}$<br>[GPa] | $E_{esp}$<br>[GPa] | $\sigma_h$<br>[Pa] | $\sigma_v$<br>[Pa] | $\sigma_{prom}$<br>[Pa] |
| L10F15    | 1,50               | 2,60E-04       | 1,00E-04       | 1,80E-04            | 1,20E-04           | 2,60               | 3,00               | 2,80                    |
| L10F30    | 1,65               | 4,00E-04       | 1,00E-04       | 2,50E-04            | 1,52E-04           | 3,30               | 3,25               | 3,28                    |
| L15F15    | 1,62               | 1,12E-04       | 4,00E-04       | 2,56E-04            | 1,58E-04           | 3,90               | 1,50               | 2,70                    |
| L15F30    | 1,76               | 1,12E-04       | 4,00E-04       | 2,56E-04            | 1,46E-04           | 4,90               | 2,40               | 3,65                    |
| P10L10F15 | 1,60               | 2,00E-06       | 2,50E-05       | 1,35E-05            | 8,46E-06           | 0,30               | 1,50               | 0,90                    |
| P10L10F30 | 1,91               | 3,13E-06       | 0,00E+00       | 1,56E-06            | 8,18E-07           | 0,10               | 0,20               | 0,15                    |
| P10L15F15 | 1,76               | 2,80E-05       | 2,50E-05       | 2,65E-05            | 1,51E-05           | 0,50               | 0,40               | 0,45                    |
| P10L15F30 | 2,02               | 2,00E-05       | 0,00E+00       | 1,00E-05            | 4,96E-06           | 0,30               | 0,20               | 0,25                    |

En la Figura 5.6 se muestra el módulo elástico experimental de cada muestra, versus la densidad del compuesto. Se contempla, además, que los objetivos específicos de esta investigación, buscan determinar un material con alto módulo específico y baja densidad. Se evidencia, también, los bajos módulos elásticos obtenidos por las muestras con presencia de PEG 400.

Por último, se constata un aumento en la densidad de las muestras, al comparar la densidad teórica con la experimental. Esto se debe probablemente a la aplicación de una estimación en el cálculo, al no contar con el dato de la masa debido a pérdidas del proceso experimental. Dicha estimación considera que hay pérdidas únicamente en la matriz de PLA, y no en el material de relleno. Ello, implica que se está aplicando una fracción másica del material de relleno que no corresponde a la situación verdadera; debería ser menor a la que se está considerando en los cálculos.

Debido a aquello, se sugiere, en próximas investigaciones, medir la masa efectiva de pérdida de material compuesto durante el proceso de conformado, para obtener para metros más ajustados a los valores reales.

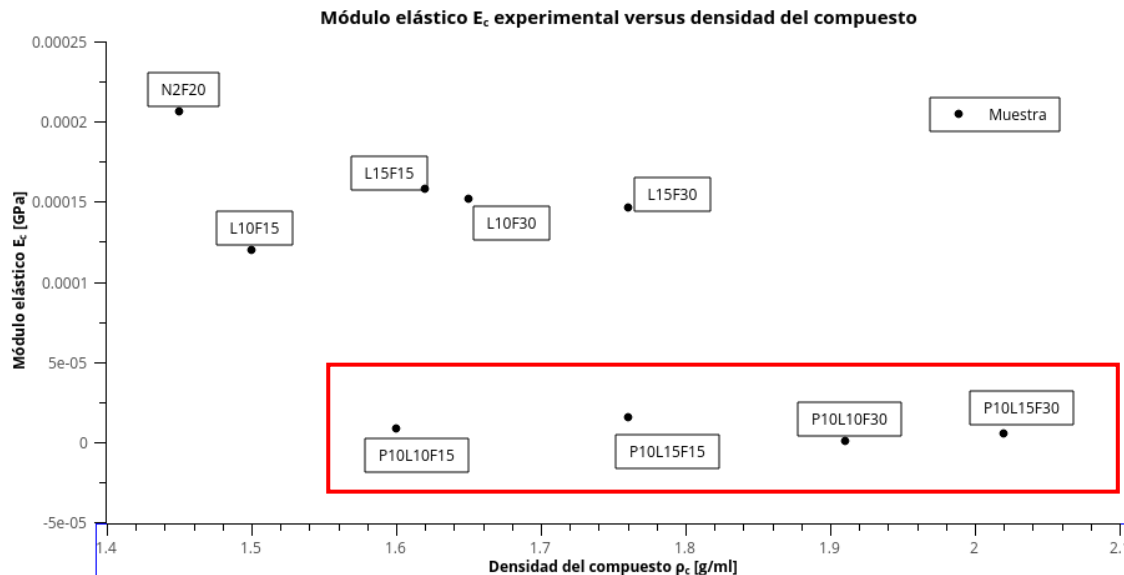


Figura 5.6. Módulo elástico experimental versus densidad del compuesto para cada muestra. En rojo, las muestras con menor densidad (PEG 400)

Por otro lado, en la Figura 5.7 se muestra el módulo de Young versus la densidad, para los 3 grupos generales de materiales (cerámicos, metálicos y poliméricos). Se ubica al material seleccionado (probeta L15F30) en dicha gráfica, la cual se ubica por sobre los materiales naturales y poliméricos.

En la gráfica se observa en rojo el valor del módulo de Young teórico promedio y la densidad del compuesto seleccionado (muestra L15F30). Se destaca lo alejado que se encuentra el punto, de la sección de materiales naturales. Por otro lado, se encuentra muy cerca de la sección de “polímeros (sintéticos)”. Esto puede sugerir, a simple vista, que el material posee una densidad mucho más cercana al área de polímeros, que de materiales naturales.

En la misma gráfica, se muestra en amarillo la magnitud del módulo elástico versus la densidad del compuesto, para la muestra sometida a ensayo de tracción. Se evidencia una enorme diferencia entre el valor teórico máximo, y el valor experimental obtenido. Por ello, se requieren realizar nuevos ciclos de experimentos, para aumentar las réplicas de cada espécimen, y para construir y robustecer una superficie de respuesta ante la propiedad física buscada. A pesar de aquello, en la Tabla 15 se toma el valor del módulo específico teórico y experimental calculados, y se comparan con el mismo módulo para otros materiales naturales y sintéticos.

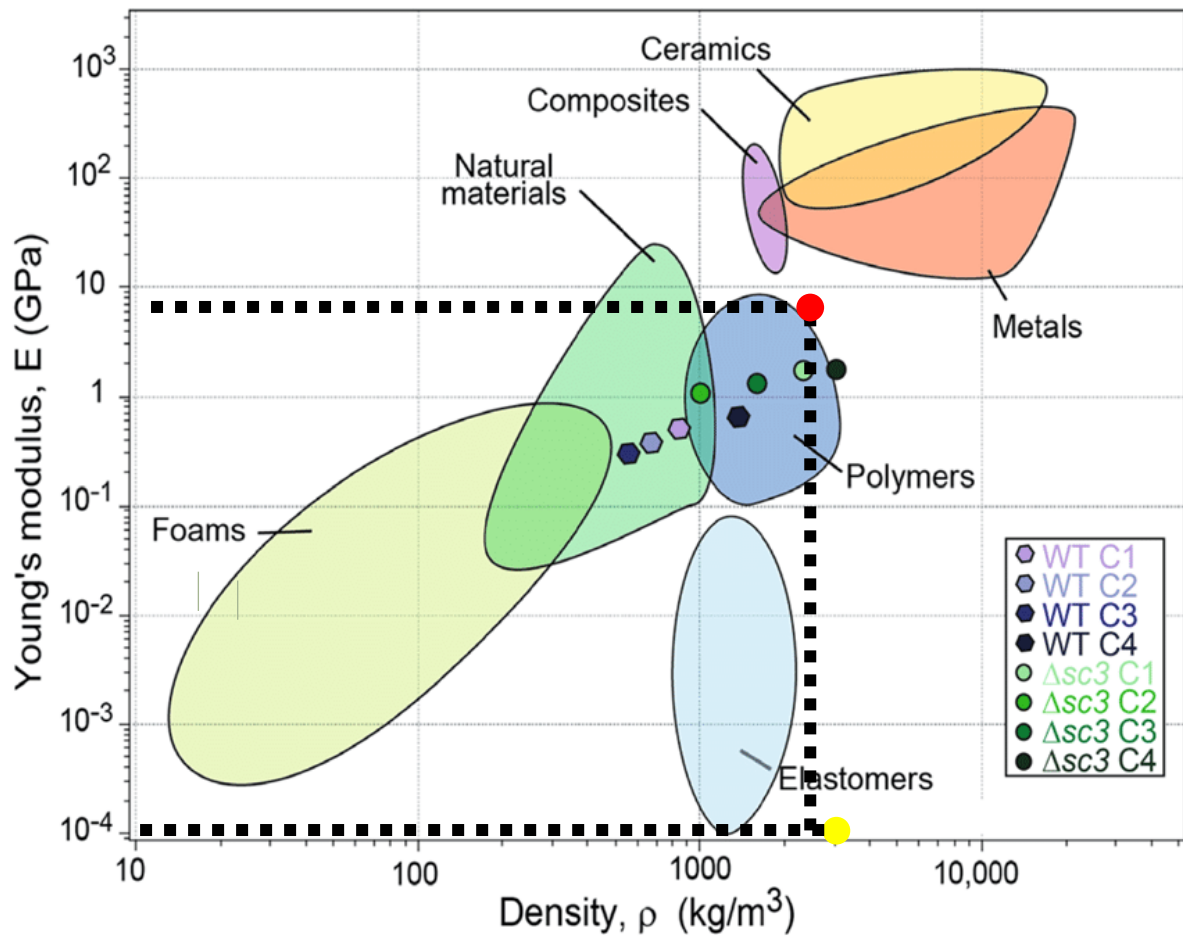


Figura 5.7. Gráfica del módulo de Young versus la densidad de los materiales. En rojo, se posiciona al material diseñado de manera teórica, y en amarillo, el material obtenido en laboratorio (Callister y Rethwish, 2009).

Tabla 15. Comparación módulos de rigidez para distintos materiales.

| Material                              | Módulo específico [ $\text{GPa/g/cm}^3$ ] |
|---------------------------------------|-------------------------------------------|
| <b>Cannaplast L15F30 teórico</b>      | <b>6,68</b>                               |
| <b>Cannaplast L15F30 experimental</b> | <b>1,46E-04</b>                           |
| PP+FV (20%p/p)                        | 3,6                                       |
| PLA                                   | 2,82                                      |
| PP                                    | 2,2                                       |
| HDPE                                  | 1,5                                       |

Se destaca el alto valor de módulo específico teórico en relación a otros materiales de similares propiedades, en particular del polipropileno mezclado con fibra de vidrio 20%p/p. El valor del módulo específico experimental de Cannaplast L15F30 representa apenas el 0,002% del valor teórico máximo de la misma muestra.

### 5.3. Análisis microscópico de las muestras elaboradas.

A cada una de las muestras expuestas en la Tabla 13, se realizaron 10 fotografías en microscopio con un aumento de 4X, en el Laboratorio de Nanobiomateriales UTFSM. Los 10 puntos fueron escogidos de manera equidistante al centro de cada disco de muestra. Las 10 fotografías asociadas a cada muestra se exponen en el Anexo G. Sin embargo, a modo de ejemplo, en la Figura 5.8 se expone una fotografía de la muestra con mejores propiedades (L15F30).

En las fotografías, se observa un entramado de fibras compactadas, y aglomeradas por un material brillante; el PLA. Si se considera como un plano a la superficie de la muestra más cercana al microscopio, es posible observar espacios vacíos en la matriz, que van del 0% al 40% aproximado en las muestras sin Polietilenglicol, y del 20% al 50% en las muestras con PEG. El nivel de vacío es un indicio de la función dispersante del PEG, el cual otorga un mayor grado de vacío para las muestras con presencia del aditivo señalado.

Dentro de las observaciones más evidentes, se destaca un elevado grado de dispersión de la concentración de lignina. En las muestras, se observan zonas con una mezcla homogénea entre fibras, PLA y lignina. Sin embargo, dichas zonas se ubican de tal manera, que la concentración de lignina disminuye a tal punto de no existir presencia del biopolímero en cerca de la mitad de la matriz. Incluso, se observan aéreas con lignina altamente concentrada, en forma similar a cristales. Luego de examinar las fotografías de las muestras, se concluye una condición de alta heterogeneidad del material compuesto, encontrándose en menor medida en las muestras sin PEG.

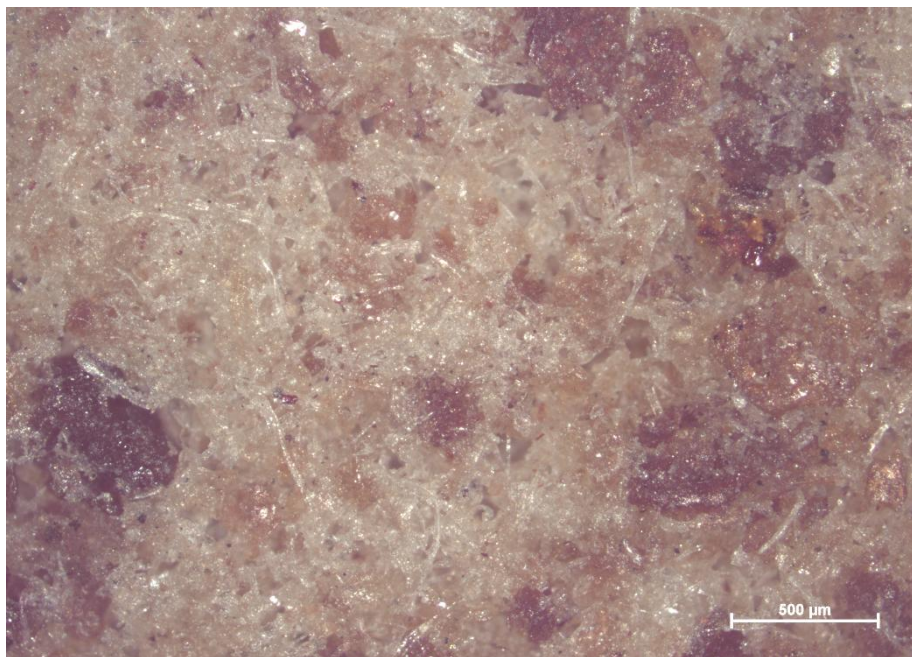


Figura 5.8. Fotografía en microscopio de la muestra L15F30 a un aumento de 4X (Laboratorio de Nanobiomateriales UTFSM).

#### 5.4. Diagramas de flujo para la elaboración de las muestras.

Se elaboraron diagramas de flujo para tres sub-procesos principales: obtención de biomasa lignocelulósica, fraccionamiento, y producción. El resultado se muestra en la Figura 5.9, 5.10 y 5.12, en donde se grafican las operaciones unitarias, inputs y outputs. Para calcular balances de masa y energía, se considera a cada operación unitaria como un “nodo”.

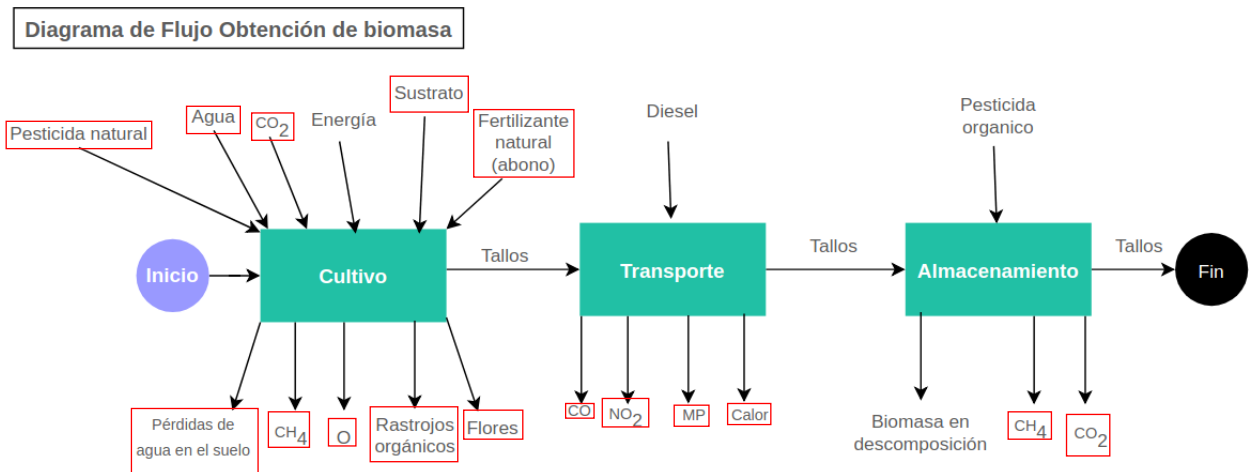


Figura 5.9. Diagrama de flujo para la obtención de biomasa lignocelulósica. Cada operación unitaria se asocia a inputs y outputs.

En el siguiente diagrama, se muestra la preparación de las muestras (Figura 5.10).

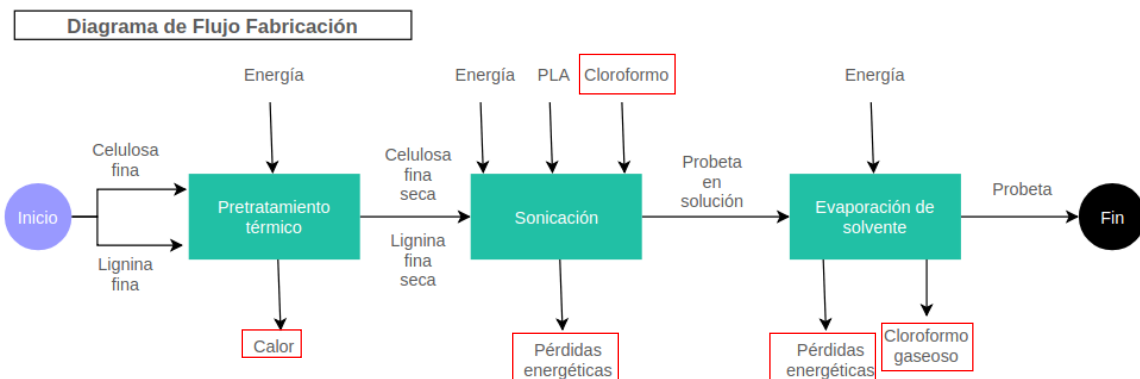


Figura 5.10. Diagrama de flujo para la obtención de probetas de material compuesto, a partir de biomasa lignocelulósica.

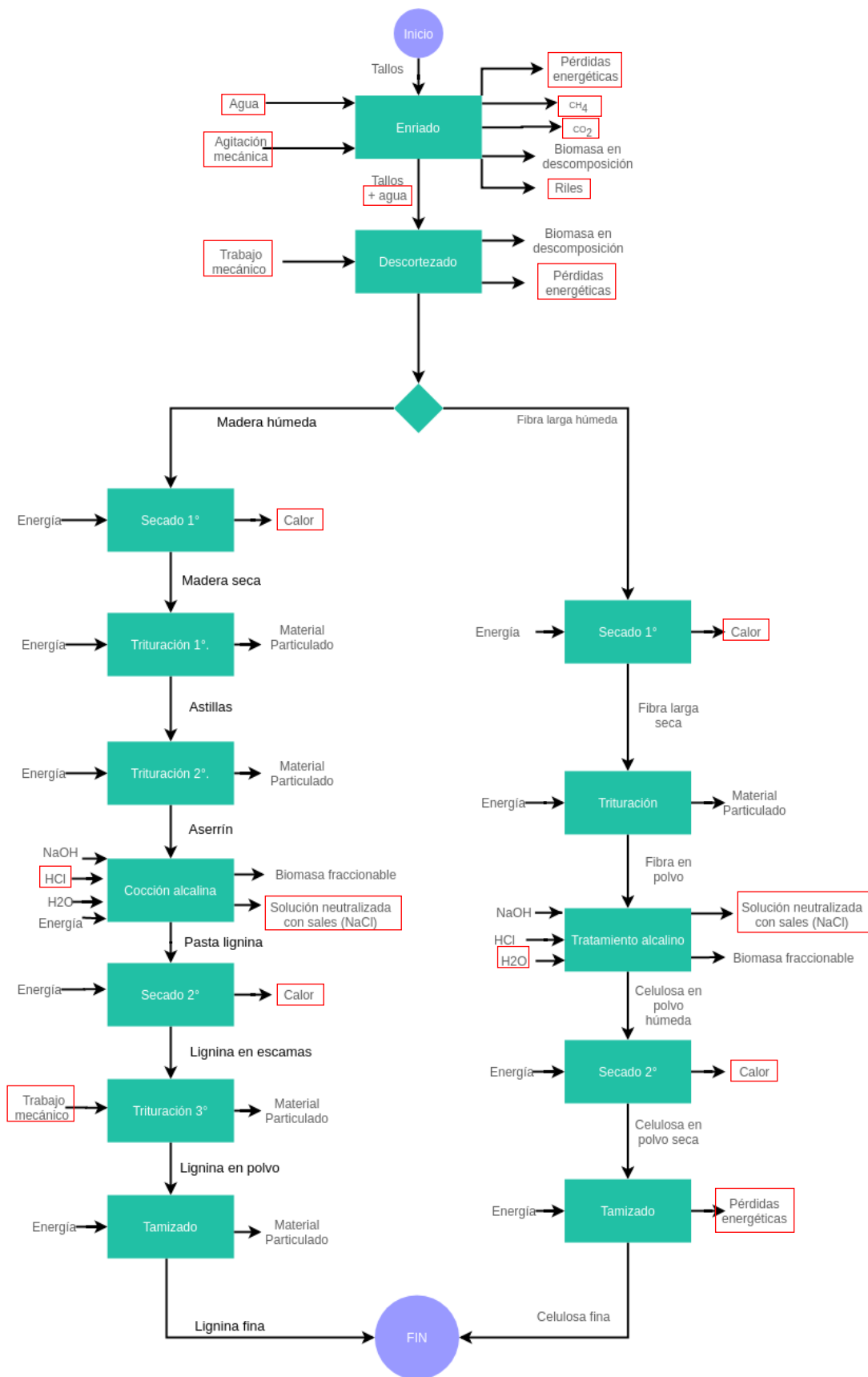


Figura 5.11. Diagramas de flujo para el proceso de fraccionamiento de biomasa lignocelulósica (tallos), en biopolímeros de lignina y celulosa (fina).

Para el resto de los cálculos y modelos empleados en la investigación aplicada en laboratorios, se aclara que hay ciertos inputs y outputs que se consideran como despreciables. Ello, debido a

que en muchos casos se consideran cercanos a 0, o bien, se requiere el uso de software con librerías digitales, lo cual está fuera del alcance de esta investigación. Aquellos flujos que se desprecian, se destacan en rojo en las Figuras 5.9, 5.10 y 5.11.

### 5.5. Costos de fabricación de la muestra “L15F30”.

Apuntando a progresar en la labor por abordar dos de los tres grandes desafíos mencionados en este documento para la industria química respecto al desarrollo de los bioplastics (avances con nuevas fuentes renovables de suministros, a la vez que son competitivas en costos), es que se plantea el cálculo de costos del material ensayado (formulación L15F30), comprendiendo el contexto de producción a escala de laboratorio, y en las fases preliminares de la investigación de la materia prima. Se calcularon los costos necesarios para producir el material compuesto seleccionado, en base a una probeta de 2 g; un kilo del material; y un pallet de 11,8 kg. Los resultados se muestran en la Tabla 16.

Tabla 16. Costos asociados a manufactura de probeta seleccionada, en base a la masa por probeta; por kilo, y por pallet.

| Ítem         | Nombre            | Costo por probeta (CLP/2 [g]) | Costo por kilo (CLP/kg) | Costo por pallet (CLP/11,8kg) |
|--------------|-------------------|-------------------------------|-------------------------|-------------------------------|
| MP           | PLA               | \$5,28                        | \$2.640                 | \$31.152                      |
| MOD          | Sueldo operario   | \$7280                        | \$3.640.000             | \$42.952.000                  |
| CIF          | Energía eléctrica | \$593                         | \$296.499               | \$3.498.688                   |
| CIF          | Diesel            | \$1,6                         | \$783                   | \$9.239                       |
| CIF          | Fungicida         | \$152,4                       | \$76.218                | \$899.372                     |
| CIF          | Cloroformo        | \$209,7                       | \$104.853               | \$1.237.265                   |
| CIF          | HCl               | \$210                         | \$10.500                | \$123.900                     |
| CIF          | NaOH              | \$28,2                        | \$14.124                | \$166.663                     |
| <b>TOTAL</b> |                   | <b>\$8.480</b>                | <b>\$4.145.617</b>      | <b>\$48.918.279</b>           |

Para calcular los Costos Totales del material por kilo, se toma en consideración la Ecuación 12:

$$CT = MP + MOD + CIF \quad (2)$$

En donde CT: Costos Totales; MP: Materias Primas; MOD: Mano de Obra Directa; CIF: Costos Indirectos de Fabricación.

Además, para el cálculo de la Mano de Obra Directa, se toma en consideración un total de 1092 horas de manufactura requeridas para fabricar 1 kilo de material, en donde se prorratea en base a un sueldo de \$600.000 pesos chilenos. En la Tabla 17 se muestran los costos de manufactura desglosados según el tipo de costo, y se efectúa una comparación porcentual entre ellos.

Tabla 17. Costos de manufactura de Cannaplast L15F30 [USD/kg], desglosado según tipo de costo.

| Ítem            | Costo<br>[USD/kg] | % del total |
|-----------------|-------------------|-------------|
| Materias Primas | 3,43              | 0,06        |
| MOD             | 4.732             | 87,80       |
| CIF             | 654               | 12,13       |
| TOTAL           | 5.389             | 100         |

En base a los datos calculados, se destaca el excesivo costo de la Mano de Obra Directa, equivalente a 4,732 dólares por kilo de material, lo cual representa el 87,8% de los costos totales de manufactura. Esto se explica por la elevada cantidad de horas requeridas para fabricar 1 [kg] de material, ya que los métodos de fabricación son a escala de laboratorio, y no han sido optimizados para garantizar mínimos tiempos de operación, ni mínimos costos. De igual manera, se constatan los bajos rendimientos de fraccionamiento de biomasa (cercaos al 1%) tanto para la obtención de lignina, como de fibras de celulosa. Incluso, se evidencia que no se trabajó en una instalación en donde poder integrar todos los procesos, lo que explica, además, las altas ineficiencias y altos tiempos de procesamiento del material.

Al comparar el precio de material L15F30 por kilo (Tabla 18), es posible advertir los bajos costos de material convencional por kilo (Polipropileno + fibra de vidrio, PLA, PET), los cuales rondan entre 1,6 y 2,65 dólares norteamericanos. Dichos materiales existen hace décadas en el mercado, se manufacturan en grandes escalas, y han sido optimizados para ser competitivos en precio. Por otro lado, al comparar la muestra L15F30, con un material similar (creado en laboratorio a modo exploratorio) elaborado a partir de fibras de plátano tratadas químicamente, y con una matriz de poliéster, se advierte un precio similar: la probeta de 2 g elaborada en esta investigación equivale a un costo “de la cuna a la puerta” de \$8.480 CLP, y una probeta similar del biocompuesto a partir de fibras de plátano equivale \$8.677 CLP (Rodríguez *et al.*, 2018). Es

decir, si bien el costo de manufactura de la formulación L15F30 es relativamente alto respecto a materiales ya desarrollados en el mercado, tiene, finalmente, un precio similar a materiales biocompuestos desarrollados a escala de laboratorio.

Tabla 18. Comparación de costos de manufactura de Cannaplast L15F30 [USD/kg], versus otros materiales.

| Material                 | Costo [USD/kg] |
|--------------------------|----------------|
| <b>Cannaplast L15F30</b> | <b>5.389</b>   |
| PP+GF*                   | 1,40 – 2,20    |
| PLA*                     | 1,75 - 2,65    |
| PET*                     | 1,6 - 1,7      |

\* Recopilados en spanish.alibaba.com

### 5.6. Indicadores de impacto ambiental.

Para comprender el impacto ambiental del material desarrollado, y simulado para la manufactura de pallets de 11,8 [kg] del material investigado, se realizó un Análisis de Ciclo de Vida, obteniendo los resultados esquematizados en las secciones que siguen a continuación.

#### 5.6.1. Análisis de Inventario (LCI).

Se consideró un análisis “de la cuna a la puerta”, evaluando el proceso desde el cultivo de la planta, hasta la fabricación del pallet. El esquema de entradas y salidas de materiales y energía por proceso se muestra en la Figura 5.12.

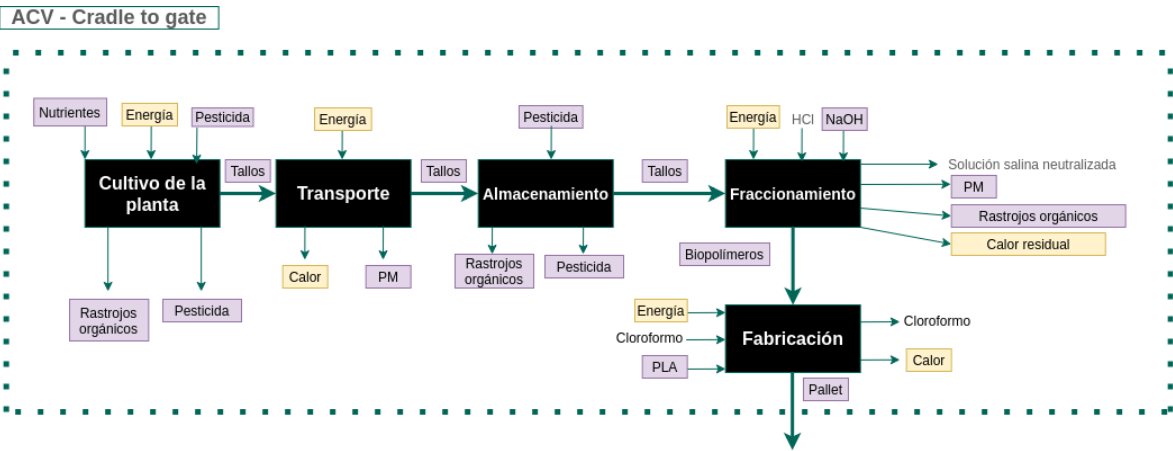


Figura 5.12. Diagrama de Flujo del Análisis de Inventarios aplicado al proceso estudiado, incluyendo el análisis desde el cultivo, hasta la manufactura (“cradle-to-gate”), y considerando los materiales (en morado) y energía (en amarillo) que fluyen a través de cada proceso. Elaboración propia.

En base a dichas entradas y salidas de flujos de materiales y energía, los inputs se clasifican según como lo muestra la Tabla 19. Por otro lado, los outputs se organizan según lo señalado en la Tabla 20.

Tabla 19. Inputs en el análisis “de la cuna a la puerta” realizado en la presente investigación.

| Nombre            | Categoría |
|-------------------|-----------|
| Tallos            | Material  |
| Pesticida         | Material  |
| NaOH              | Material  |
| HCl               | Material  |
| PLA               | Material  |
| Energía eléctrica | Energía   |
| Petróleo Diesel   | Energía   |

Tabla 20. Outputs en el análisis “de la cuna a la puerta” realizado en la presente investigación.

| Nombre                    | Categoría            |
|---------------------------|----------------------|
| Producto (pallet)         | Material             |
| Biomasa fraccionable      | Material             |
| Solución salina           | Material como soluto |
| Material Particulado      | Material             |
| Biomasa en descomposición | Material             |
| Calor                     | Energía              |

Se cuantifican las materias primas más relevantes que ingresan y egresan del sistema, así como también, el gasto energético. Los valores se muestran en la Tabla 21.

Tabla 21. Valores de los flujos de materiales y energía, para ACV realizado.

| Ítem       | IN                       | OUT                      |
|------------|--------------------------|--------------------------|
|            | Cantidad por pallet [kg] | Cantidad por pallet [kg] |
| Tallos     | 101,5                    | -                        |
| Diesel     | 30,1                     | -                        |
| Pesticida  | 20,3                     | 20,3                     |
| Biomasa en | -                        | 24,4                     |

|                      |      |      |
|----------------------|------|------|
| descomposición       |      |      |
| PLA                  | 6,5  | -    |
| NaOH                 | 17,3 | 17,3 |
| HCl                  | 57,8 | 57,8 |
| Material Particulado | -    | 14,3 |
| Biomasa fraccionable | -    | 53,7 |
| Producto final       | -    | 11,8 |

Se destaca la cantidad requerida de tallos para fabricar un pallet de carga; con aproximadamente 100 kilos de material lignocelulósico, se pueden fabricar 11,8 kilos de producto. Esto equivale, aproximadamente, a los tallos residuales de 1000 plantas cannabáceas.

Se destaca, además, que un co-producto importante que sale del sistema, es la “biomasa fraccionable”, la cual consiste en celulosa, hemicelulosa, azúcares, pectina, grasas y otros compuestos menores. Este co-producto puede ser aprovechable (teóricamente), por lo que se sugiere investigar dicha hipótesis en posteriores investigaciones.

En la Tabla 22, se muestra el consumo energético necesario para fabricar 1 pallet del material Cannaplast L15F30. Se destaca el alto consumo energético requerido para efectuar el cultivo de la planta en modo “indoor”. En la Figura 6.11 se muestra la comparación porcentual para cada proceso.

Tabla 22. Consumo energético por proceso en ACV realizado.

| Proceso         | Cantidad [kW h/pallet] | % del total |
|-----------------|------------------------|-------------|
| Cultivo         | 29.736                 | 74,9        |
| Transporte      | 81,42                  | 0,2         |
| Almacenamiento  | 0                      | 0           |
| Fraccionamiento | 9.634                  | 24,3        |
| Fabricación     | 272,7                  | 0,7         |
| TOTAL           | 39.723                 | 100         |

## 5.6.2. Análisis de Impacto Ambiental (LCAI).

Por último, se calcula el potencial de calentamiento global del ciclo de vida del producto analizado, en base a la cantidad de kilos de  $CO_2$  equivalente emanados por kW h, asociados al

consumo energético necesario para la producción de un pallet de carga manufacturado a partir de Cannaplast L15F30. En la Tabla 23 se muestran los resultados, en donde se destaca el mayor consumo energético; el proceso del cultivo de la planta, con 12.191,8 kilos de  $CO_2$  equivalente. Este alto valor es atribuido al uso de lámparas de halogenuros metálicos para simular la radiación solar. Sin embargo, la planta estudiada también absorbe  $CO_2$ , lo cual debería mitigar el alto consumo calculado. No obstante, el cálculo de la absorción de  $CO_2$  no es incluido en los alcances de esta investigación, requiriendo del uso de software con acceso a librerías digitales, como OpenLCA.

Tabla 23. Equivalencia en kilos  $CO_2$ , por kW h, por pallet producido, en ACV realizado.

| Proceso         | Cantidad de $CO_{2eq}$ [kilos de $CO_2$ por kW h por pallet] |
|-----------------|--------------------------------------------------------------|
| Cultivo         | 12.191,8                                                     |
| Transporte      | 33,4                                                         |
| Almacenamiento  | 0                                                            |
| Fraccionamiento | 3.949,7                                                      |
| Fabricación     | 111,8                                                        |
| TOTAL           | 16.286,7                                                     |

### 5.6.3. Interpretación.

En la Tabla 24, se muestran los niveles de consumo energético total, para 3 materiales compuestos.

Tabla 24. Comparación de consumo energético de Cannaplast L15F30, versus otros materiales.

| Material          | Consumo energético [kW h/pallet] | % de consumo respecto a Cannaplast L15F30 | kg* $CO_{2eq}$ *kW h/pallet |
|-------------------|----------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------|
| CANNAPLAST L15F30 | 39.723,6                         | 100                                       | 16.287                      |
| PP+GF             | 388,9                            | 0.98                                      | 159                         |
| PP+Reed           | 199,2                            | 0.50                                      | 82                          |

Se evidencia un consumo energético considerablemente alto, en base a la manufactura de un producto compuesto por Cannaplast L15F30 respecto a otros materiales en el mercado

(Nicollier. et al, 2001). Aquello, deriva en altas emisiones de  $CO_2eq$ . En la Figura 5.13 se observa una comparación gráfica del consumo energético por material. No obstante, se subraya el contexto de la investigación; corresponde a los inicios del desarrollo del material a escala de laboratorio, por lo cual, los rendimientos y eficiencias del proceso se encuentran en fase rudimentaria, y resulta impreciso comparar adecuadamente con otros materiales que presentan mayor desarrollo en el mercado. Finalmente, se recalca la importancia y la necesidad de simular ciclos de vida similares, con software adecuado y asociado a librerías digitales, para efectuar comparaciones entre materiales con mayor certidumbre.

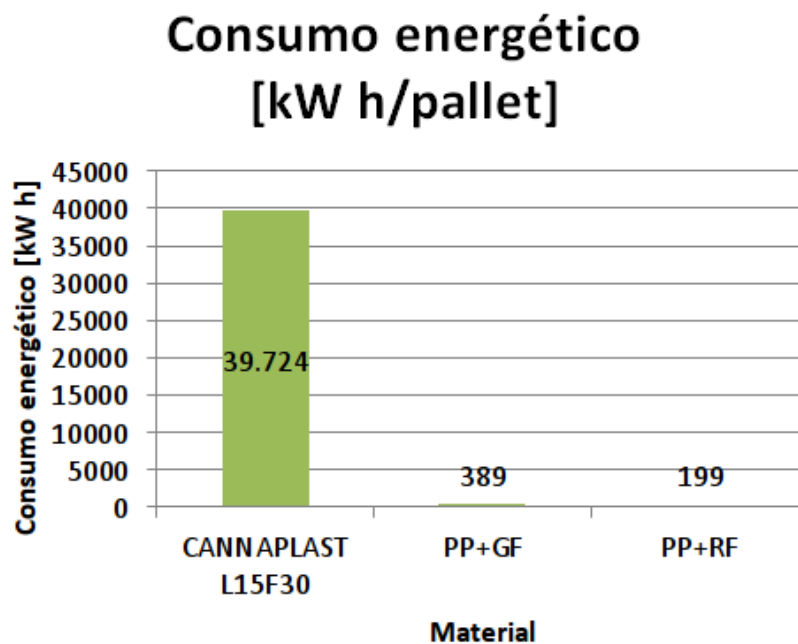


Figura 5.13. Comparación (en %), de consumo energético por proceso requerido para la manufactura de 1 pallet de carga a partir de Cannaplast L15F30, de polipropileno mezclado con fibra de vidrio (PP+GF), y de polipropileno mezclado con relleno de fibra “Reed” (PP+RF).

## Capítulo 6: Propuesta de Valor.

---

El propósito de la presente investigación, se fundamenta en la búsqueda del desarrollo de nuevos suministros de materias primas de origen local, que representen menor impacto ambiental y riesgos a la salud, a la vez que se busca identificar suministros de bioplásticos con costos menores a materiales compuestos convencionales. Igualmente, se busca generar I+D+i a partir de un residuo que, actualmente, y de forma generalizada en los cultivos industriales chilenos de esta planta en particular, se destina a la combustión sin aprovechar ninguna de sus propiedades.

Por otro lado, se valora la búsqueda de la industria química global, de modelos de negocio innovadores (Iles y Martin, 2012), que incorporen criterios de sustentabilidad y triple impacto. Por último, las tendencias de los últimos años en la industria de manufactura de bioplásticos, buscan desarrollar mecanismos de trazabilidad, que permitan comunicar a los distintos “*stakeholders*”, o miembros de la comunidad global (usuarios, gobiernos, instituciones), el impacto socioambiental de productos desarrollados con criterios de sustentabilidad. A la vez, dichos dispositivos de trazabilidad permiten efectuar comparaciones con otros materiales, ya sea convencionales y sintéticos, o bien, naturales e innovadores. Ello, permite desarrollar una toma de decisiones más informada, y se orienta a considerar el impacto ambiental de materiales y productos a la hora de desarrollar negocios y políticas públicas.

A continuación, se señalan propuestas de valor tanto para los biopolímeros obtenidos, el material desarrollado (Cannaplast L15F30), y el producto simulado, asociado a la trazabilidad del impacto ambiental.

### **6.1. Biopolímeros.**

La utilización de biopolímeros ofrece una amplia gama de beneficios para la utilización en materiales compuestos. En este caso, se consiguió obtener celulosa y lignina en formato polvo, con tamaños de partículas menores a 500 [ $\mu m$ ]. A partir de las referencias bibliográficas estudiadas, de los datos experimentales obtenidos, y de las propiedades calculadas, es posible declarar los siguientes beneficios:

- a) La celulosa, empleada como material de relleno/refuerzo, permite disminuir la utilización de plásticos comerciales con una alta huella de carbono asociada al transporte desde países lejanos (USA, China). Esto, debido al carácter de materia prima local, obtenida a partir de residuos agroindustriales (Iles y Martin, 2012).

- b) Al incorporar fibra de celulosa en matrices plásticas, y mediante la regla de las mezclas, es posible, al menos teóricamente, aumentar el módulo específico del material. Esto implica menores costos de transporte para el producto final, a la vez que se asegura una performance mecánica similar a otros materiales compuestos semejantes (Masirek *et al.*, 2007).
- c) La aplicación de lignina en matrices termoplásticas, permiten aumentar la resistencia al deterioro por condiciones climáticas, permitiendo conservar las propiedades físicas y mecánicas por más tiempo (Spiridon *et al.*, 2014). Sin embargo, se hace necesario ensayar y comprobar dichas propiedades.
- d) La utilización de biopolímeros de celulosa como material de refuerzo, permite reemplazar materiales considerados como peligrosos, aportando en mejorar la salud de los trabajadores. Uno ejemplo de este tipo de material es la fibra de vidrio, la cual genera problemas respiratorios en los operarios, debido a material particulado emanado en los procesos de fabricación (Pietropaoli *et al.*, 2015).
- e) El empleo de biopolímeros como la lignina y celulosa, como material de relleno, permiten el desarrollo de bioplásticos biobasados y biodegradables, con propiedades mecánicas excepcionales (Quarshie y Carruthers, 2014).

Los biopolímeros obtenidos, de lignina y celulosa, se pueden apreciar en las Figuras 4.3 y 4.2, respectivamente. Según lo comentado anteriormente, la venta de lignina y celulosa en polvo representa una oportunidad comercial de potencial interés a seguir investigando.

## **6.2. Material.**

A partir de los resultados obtenidos respecto al material desarrollado, y en base a la formulación con el mayor módulo de elasticidad específico (L15F30), se exponen los siguientes beneficios asociados:

- a) El material obtenido posee un módulo específico teórico superior a otros termoplásticos sintéticos sin refuerzo, e incluso superior a otros plásticos reforzados, como el polipropileno reforzado con fibra de vidrio. No así, con el módulo específico experimental, el cual está muy por debajo de otros materiales del mercado (debido al carácter preliminar de esta investigación).
- b) El material desarrollado posee la capacidad (teórica) de biodegradarse en condiciones de compostaje industrial (a determinada temperatura, pH y humedad). Además, es un material 100% de origen biológico. Se hace necesario testear dicha hipótesis con un ensayo de biodegradabilidad.

En la Tabla 12 se muestra el espécimen del material obtenido, con la denominación “Cannaplast L15F30”, el cual fue seleccionado por poseer el módulo específico más alto. De manera que, y según lo anteriormente mencionado, la comercialización de un material compuesto con biopolímeros biodegradables y de origen renovable, representa un potencial técnico de alto interés para reemplazar a plásticos sintéticos similares

### 6.3. Producto simulado.

Finalmente, el producto simulado para realizar el Análisis de Ciclo de Vida, consiste en un pallet de carga, con una masa de 11,8 [kg], y compuesto por un 30% p/p de fibra de celulosa, un 15% p/p de lignina y un 55% p/p de PLA. Se escoge este producto, debido a una serie de propiedades intrínsecas del material obtenido, como un relativamente alto módulo específico teórico, una (teóricamente) relativamente alta resistencia a la tracción, flexión y compresión, y una resistencia ante el deterioro mecánico debido a condiciones climáticas.

Las ventajas de emplear este material (Cannaplast L15F30), por sobre otros termoplásticos reforzados con fibras sintéticas, o bien, pallets de madera, se muestra a continuación:

- a) El relativamente alto módulo específico teórico, lo que permite disminuir costos de transporte del producto.
- b) Al ser conformado mediante moldeo por compresión, el producto puede adquirir una alta variedad de geometrías, lo que permite ser diseñado para encajar entre sí, y poder apilar una gran cantidad de productos (se estima una capacidad máxima de apilamiento de 50 pallets o más en 2 [m] de altura) (Nicollier, 2001).
- c) Al ser manufacturado en un 45% p/p a partir de residuos agroforestales locales, el material tiene el potencial de significar un impacto ambiental mucho menor que otros materiales sintéticos, a la vez que es 100% biobasado y (teóricamente) biodegradable.
- d) Debido a su contenido de lignina, el material presenta una resistencia al deterioro por condiciones ambientales mayor que otros materiales, lo que significa que conservará sus propiedades termo-mecánicas por más tiempo (testear hipótesis).



Figura 6.1. Fotografía esquemática de pallets de carga fabricados a partir de fibras naturales compactadas.

En base a lo mencionado, resulta de gran interés técnico continuar con la investigación de la manufactura de pallets de carga obtenidos a partir de materiales compuestos en base a biopolímeros locales, biodegradables y renovables.

#### **6.4. Otras aplicaciones.**

Comprendiendo el alto potencial de innovación de la fibra de cáñamo y Cannabis para diversas industrias, en esta sección se busca explorar otras rutas de investigación y desarrollo.

Se han reportado mayores eficiencias de filtración de aire-aceite en papeles de cáñamo, como alternativa a papeles en base a algodón, para motores de automóviles (Jianyong *et al.*, 2014). Por otro lado, es que en base a la regla de las mezclas, y debido a las excelentes propiedades mecánicas de materiales nanoestructurados, es que los materiales compuestos con nanopartículas como los nanotubos de carbono, podrían representar una alta resistencia mecánica, y alto módulo elástico, a una densidad de compuesto mínima. Lo anterior, sugiere continuar investigaciones con la utilización de nanomateriales, y bioplásticos (revisar Anexo C).

## Capítulo 7: Conclusiones

---

En la presente investigación, se ha demostrado que es posible obtener biopolímeros de celulosa y lignina a partir de tallos de residuos agroforestales, los cuales se utilizaron como refuerzo para la fabricación de prototipos de un material compuesto. Con dichos biopolímeros, se elaboran prototipos de un material biocompuesto por PLA y PEG 400, buscando optimizar el módulo de elasticidad específica.

A partir de la lignina y celulosa en polvo, se elaboran 8 muestras con distintas formulaciones. A partir de dichas muestras, se evalúa positivamente el alto módulo específico teórico de la muestra denominada “Cannaplast L15F30”, frente a otros plásticos sintéticos y reforzados con fibra de vidrio. Sin embargo, al realizar la caracterización mecánica por ensayo de microtracción a partir de las muestras elaboradas, se comprueba que el valor experimental del módulo específico, representa apenas un 0,002% respecto al valor teórico para la formulación L15F30. Respecto al método de conformado de los prototipos del material (“conformado por solución”), se diagnostica una baja capacidad para conseguir altos módulos elásticos específicos experimentales. Finalmente, respecto a las propiedades mecánicas de las muestras, se comprueba que los biopolímeros de lignina y celulosa empleados pueden mejorar el módulo elástico específico de una matriz termoplástica como el PLA, cumpliendo con su función de refuerzo en el material.

Al realizar un análisis de costos de la formulación L15F30, se constata un valor similar a otros materiales biocompuestos elaborados a escala de laboratorio, lo que revela un escenario razonable para la investigación desarrollada. Además, el Análisis de Ciclo de Vida de la “cuna a la puerta” aplicado al material, denota un nivel de gasto energético desproporcionado (39.724 kW h/pallet), y un consiguiente desmesurado nivel de contribución al calentamiento global a través de la emisión en kilos, de dióxido de carbono equivalente ( $16.287 \text{ kgCO}_{2eq}/\text{kW h/pallet}$ ). Sin embargo, al tratarse de un material elaborado a escala de laboratorio, dichos resultados se enmarcan en un desenlace esperado y optimizable en futuras investigaciones.

Finalmente, se evalúa la biomasa residual de tallos de cannabis como una fuente con alto potencial para desarrollar I+D+i orientada a desarrollar un material termoplástico reforzado, con propiedades teóricas destacables. Sin embargo, los resultados experimentales de la presente investigación no permiten concluir positivamente respecto a los prototipos testeados, lo que emplaza a continuar testeando muestras del material biocompuesto, con otros métodos de manufactura.

## Capítulo 8: Recomendaciones y proyecciones

---

Para rectificar las restricciones y simplificaciones de la investigación, se sugiere analizar otros métodos de fraccionamiento que impliquen rendimientos mayores; y tiempos de ciclo y costos menores. Además, se sugiere caracterizar las probetas con un mayor rango de densidades de compuesto y mezclas de formulaciones. Igualmente, se recomienda caracterizar los prototipos obtenidos con otros ensayos; resistencia a la compresión, flexión e impacto, compostabilidad, mojabilidad, capacidad antioxidante y climatización acelerada. A la vez, para disminuir los tiempos de ciclo de manufactura, se recomienda orientar la investigación hacia la producción a escala, y fabricar probetas mediante conformado por fusión, o por inyección de resina al vacío.

Respecto al producto simulado, modelado como un pallet de 11,8 [kg] de biopolímeros aglomerados, se sugiere desarrollar métodos de manufactura y de análisis orientados al escalamiento industrial. El elevado volumen de tallos necesarios para obtener 1 [kg] de material, sumado a los también elevados tiempos de manufactura, derivan en escasas posibilidades de escalar el producto, con los métodos de conformado desarrollados. Es por ello, que se deben buscar otros métodos de manufactura a optimizar, para desarrollar la tecnología a gran escala, como extrusión, moldeo por inyección, o infusión de resina asistida por vacío.

Finalmente, se recalcan los beneficios de normalizar la aplicación del Análisis de Ciclo de vida como mecanismo de trazabilidad del impacto ambiental de materiales y productos. Por ello, se sugiere realizar simulaciones en software como Open LCA para obtener resultados más robustos, confiables y comparables con otras entidades interesadas en el material.

Para finalizar este estudio, se señala el alto potencial innovador de este material de residuo (tallos de Cannabis). A partir de un residuo que en la realidad chilena está destinado a la combustión (sin siquiera existir un aprovechamiento energético), fue posible desarrollar un material compuesto (biobasado y biodegradable) con la posibilidad de competir con otros plásticos sintéticos, en cuanto a sus propiedades mecánicas. El desarrollo de tecnologías en base a biopolímeros obtenidos de tallos residuales de Cannabis representa una gran oportunidad para seguir realizando I+D+i orientado a desarrollar el potencial en bioeconomía en Chile y América Latina. El carácter exploratorio y preliminar de esta investigación, marcada por una pandemia que cerró laboratorios en los cuales se estaba trabajando, entregan resultados experimentales que no son los esperados. Sin embargo, los resultados teóricos evaluados sugieren continuar con las investigaciones, y desarrollar todo el potencial tecnológico posible de los residuos de la planta estudiada, empleados como material de refuerzo para la manufactura de bioplásticos compuestos.

## Capítulo 9: Bibliografía

---

- Aguila, K. (2017) "Efecto de la incorporacion de refuerzos naturales en las propiedades mecanicas de polimeros termoestables", Memoria para optar al titulo de ingeniera civil mecanica, Departamento de Ingenieria Mecanica, Universidad de Chile.
- Akil, H. et al. (2011) "Kenaf fiber reinforced composites: A review", *Materials and Design* 32 (2011) 4107-4121.
- Aurora, A., Fosfuri, A., Gambardella, A. (2001) "Markets for technology and their implications for corporate strategy", *Industrial and corporate change*. 10, 419-451.
- Asiplas. (2016). Asiplas Industriales de Plástico. Obtenido de <http://www.asipla.cl/quesel-plastico/>
- American Society for Testing and Materials (2013). *Standard Test Method for Acid-Insoluble Lignin in Wood* (ASTM D1106 - 9). <https://www.astm.org/Standards/D1106.htm>
- American Society for Testing and Materials (1978). *Method of Test for Holocellulose in Wood* (ASTM D1104 - 56). <https://www.astm.org/Standards/D1104.htm>
- American Society for Testing and Materials (1977). *Method of Test for Alpha-Cellulose in Wood* (ASTM D1103 - 60). <https://www.astm.org/Standards/D1103.htm>
- Aziz H, Ansell M., (2003) "The effect of alkalization and fibre alignment on the mechanical and termal properties of kenaf and hemp bast fibre composites: Part 1 – polyester resin matrix". Department of Engineering and Applied Science, University of Bath, UK.
- Badamasi, H. y Ibrahim, A. (2017) "Development and characterization of bio-composite: A Review", 2<sup>nd</sup> International Conference on Green Engineering for sustainable Development. Elsevier, pp 102-110.
- Bogoeva - Gaceva *et al.* (2007) "Natural fiber eco-composites". Society of Plastics Engineers.
- Callister, W. y Rethwish, D. (2009) "Materials science and engineering: an introduction. 9<sup>th</sup> Edition". USA.
- Corbiere-Nicollier, T. *et al.* (2001) "Life cycle assessment of biofibres replacing glass

- fibras as reinforcement in plastics”, Resources, conservation and recycling, pp. 267-287. Elsevier.
- Díaz, F. (2012) "Conformado de materiales plásticos", Lecturas de Ingeniería, Laboratorio de Tecnología de Materiales, Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Din, M. I., Sehar, R., Hussain, Z., Khalid, R., & Shah, A. T. (2020). Synthesis of biodegradable semolina starch plastic films reinforced with biogenically synthesized ZnO nanoparticles. *Inorganic and Nano-Metal Chemistry*, 1-10.
- Furkan, H. y Remzi, C. (2015) "Lignocellulosic Biomass: A Sustainable Platform for Production of Bio-Based Chemicals and Polymers", *Journal of Polymer Chemistry*.
- Giudice *et al.* (2006) "Product design for the environment: A life Cycle Approach, FL, USA, ISBN 0-8493-2722-9
- Graedel, T. y Saxton, E. (1998) "Streamlined Life-Cycle Assessment", Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Hui-Chen Lu, K. M. (2015). An introduction to the endogenous cannabinoid. *Psiquiatría Biológica*.
- Hinojosa, M. y Marin, Isidro (2017) "Henry Ford y su prototipo ... "de cáñamo?", Cannabis Magazine, Universidad Nacional de Loja, Ecuador.
- Iles, A. y Martin, A. (2012) "Expanding bioplastics production: sustainable business innovation in the chemical industry", *Journal of Cleaner Production*. Elsevier, 45, pp. 38-49. doi: 10.1016/j.jclepro.2012.05.008
- Interior, M. (2015, 22 octubre). LEY-20000 16-FEB-2005 MINISTERIO DEL INTERIOR (Biblioteca del Congreso | Ley Chile). [www.bcn.cl/leychile](http://www.bcn.cl/leychile). <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=235507>
- Jianlei Yang, Y. C. (2019). Applications of Lignocellulosic Fibers and Lignin in Bioplastics: A Review.
- Jiayong, F. y Jianchun, Z. (2014) "Preparation and oil/air filtration properties of hemp paper", *Journal of Industrial Textiles*, Vol. 45, 3-32.
- Kraśniewska, K., Galus, S., & Gniewosz, M. (2020). Biopolymers-Based Materials Containing Silver Nanoparticles as Active Packaging for Food Applications—A Review. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(3), 698.
- Kretschmer, B. *et al.* (2013) "Recycling agricultural, forestry & food wastes and residues for sustainable bioenergy and biomaterials", *Technology options for*

- feeding 10 billion people Study, Science and Technology Options Assessment.
- Kun, D. y Pukánszky, B. (2017) "Polymer lignin blends: Interactions, properties, applications", European Polymer Journal.
- Liu, M. *et al.* (2017), "Targeted pre-treatment of hemp bast fibres for optimal performance in biocomposite materials: A review", Industrial Crops and Products, 108, pp 660-683. Science Direct.
- Machado, N. T. (2016). "ESTUDO DA HIDRÓLISE ENZIMÁTICA DO CAROÇO DE AÇAÍ (*Euterpe oleraceae* Mart) PARA A PRODUÇÃO DE ETANOL".
- Mantau, U. *et al.* (2010), "EUwood - Real potential for changes in growth and use of EU forests, Final report". Hamburg/Germany, June 2010. 160 p.
- Masirek R., *et al.* (2007), "Composites of Poly(L-lactide) with Hemp Fibers Morphology and Thermal and Mechanical Properties". Journal of Applied Polymer Science, Vol. 105, 255–268.
- Merck, [www.sigmaaldrich.com](http://www.sigmaaldrich.com). (2021) Polyethylene glycol 400. [online] Disponible en:  
 <<https://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/mm/807485?lang=es&region=CL>> [Accessed 23 February 2021].
- Mohanty, A. *et al.* (2002) "Sustainable bio-composites from renewable resources: Opportunities and challenges in the green materials world", Journal of Polymers and the Environment, 10, pp 19-26.
- Oever, M. *et al.* (2017) "Bio-based and biodegradable plastics - Facts and Figures", Wageningen Food & Biobased Research number 1722, Wageningen University.
- Park, B. *et al.* (2001) "PLA/Chain-Extended PEG Blends with Improved Ductility", Journal of Applied Polymer Science, Vol. 123, 2360–2367.
- Pecenka, R. y Gusovius, H. (2021) "Design of Competitive Processing Plants for Hemp Fibre Production", International Scholarly Research Network, ISRN Agronomy, Volume 2012, Article ID 647867, 5 pages.
- Plastics - The Facts. (2016). PlasticsEurope Association of plastics manufactures. Obtenido de <http://www.plasticseurope.org/>
- Pietropaoli, A. *et al.* (2015) "Manejo de la fibra de vidrio en entorno laboral, potenciales efectos sobre la salud y medidas de control", Medicina y seguridad del trabajo, Instituto de salud Carlos III, pp 393-414.
- Quarshie, R. y Carruthers, J. (2014) "Technology Overview: Biocomposites".

- Knowledge, Transform, Network. Net Composites, UK.
- Radotic, K. y Micic, M. (2016) "Method for extraction and purification of lignin and cellulose from plant tissues", *Sample Preparation Techniques for Soil, Plant, and Animal Samples* (pp.365-376).
- Ramesh, M. *et al.* (2017) "Plan Fibre based bio-composites: Sustainable and renewable green materials", *Renewable and sustainable energy reviews*, 79, pp558-584. Elsevier.
- Rane, A. *et al.* (2018) "Methods for synthesis of nanoparticles and fabrication of nanocomposites", *Synthesis of Inorganic Nanomaterials, Progress in Rubber Nanocomposites*, encontrado en Elsevier.
- Rodriguez, L. *et al.* (2018) " Life-Cycle Assessment and Life-Cycle Cost study of Banana (*Musa sapientum*) fiber Biocomposite materials", 25th CIRP Life Cycle Engineering (LCE) Conference, Dinamarca.
- Salud, M. D. E. (2020, 7 mayo). DTO-404 20-FEB-1984 MINISTERIO DE SALUD (Biblioteca del Congreso | Ley Chile). [www.bcn.cl/leychile](http://www.bcn.cl/leychile). <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=13057>
- Salud, M. D. E. (2020b, mayo 7). DTO-405 20-FEB-1984 MINISTERIO DE SALUD (Biblioteca del Congreso | Ley Chile). [www.bcn.cl/leychile](http://www.bcn.cl/leychile). <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=13066>
- Sawpan, M. *et al.* (2009) "Characterisation of hemp fibre reinforced Poly(Lactic Acid) composites". *Int. J. Materials and Product Technology*, Vol. 36, Nos. 1/2/3/4.
- Siti Farah Hanun, R. *et al.* (2019) "Lyfe-Cycle Assessment )LCA) of plastic bag: current status of product impact", *International Journal of Advanced Science and Technology*, 28. pp 94-101. Elsevier.
- Spanish.alibaba.com - Información revisada en " [https://spanish.alibaba.com/product-detail/pp-gf30-polypropylene-plastic-raw-material-pp-10-50-glass-filled-granules62078069487.html?spm=a2700.7724857.normal\\_offer.d\\_title.7a8b7fd3dlQ04g&s=p](https://spanish.alibaba.com/product-detail/pp-gf30-polypropylene-plastic-raw-material-pp-10-50-glass-filled-granules62078069487.html?spm=a2700.7724857.normal_offer.d_title.7a8b7fd3dlQ04g&s=p) "
- Spiridon I., *et al.* (2014) "Evaluation of PLA–lignin bioplastics properties before and after accelerated weathering". *Composites: Part B* 69 (2015) 342–349.
- Tang, L., *et al.* (2019) "Mechanical Properties of Rubber Nanocomposites Containing Carbon Nanofillers", *Carbon-Based Nanofillers and Their Rubber Nanocomposites*. Encontrado en Elsevier.
- Tanase-Opedal M., *et al.* (2019) "Lignin: A Biopolymer from Forestry Biomass for

- Biocomposites and 3D Printing”. *Materials* 2019.
- Technical Association of Pulp and Paper Industry (2006). *Acid-insoluble lignin in wood and pulp* (TAPPI 222). <https://www.tappi.org/content/SARG/T222.pdf>
- Thomas S., (2011) “Natural Fibres: Structure, Properties and Applications”. Escuela de Ciencias Químicas, Mahatma Gandhi University, India.
- Vázquez, A., *et al.* (2016) “Bioplásticos y plásticos degradables”. Universidad Autónoma Metropolitana. México.
- Veinthal, R., (2017) "Application of Materials", Composite Materials. Tallinn University Of Technology
- Wang, C. *et al.* (2016), “Lignin-Based Thermoplastic Materials”. Departamento de biomateriales forestales, Universidad del Estado de Carolina del Norte, EEUU.
- Weiss, M. *et al.* (2012) "A Review of the environmental impacts of biobased materials". *Journal of Industrial Ecology*, 16, pp 169-181. Elsevier.

# Anexos

## Anexo A. Fibras

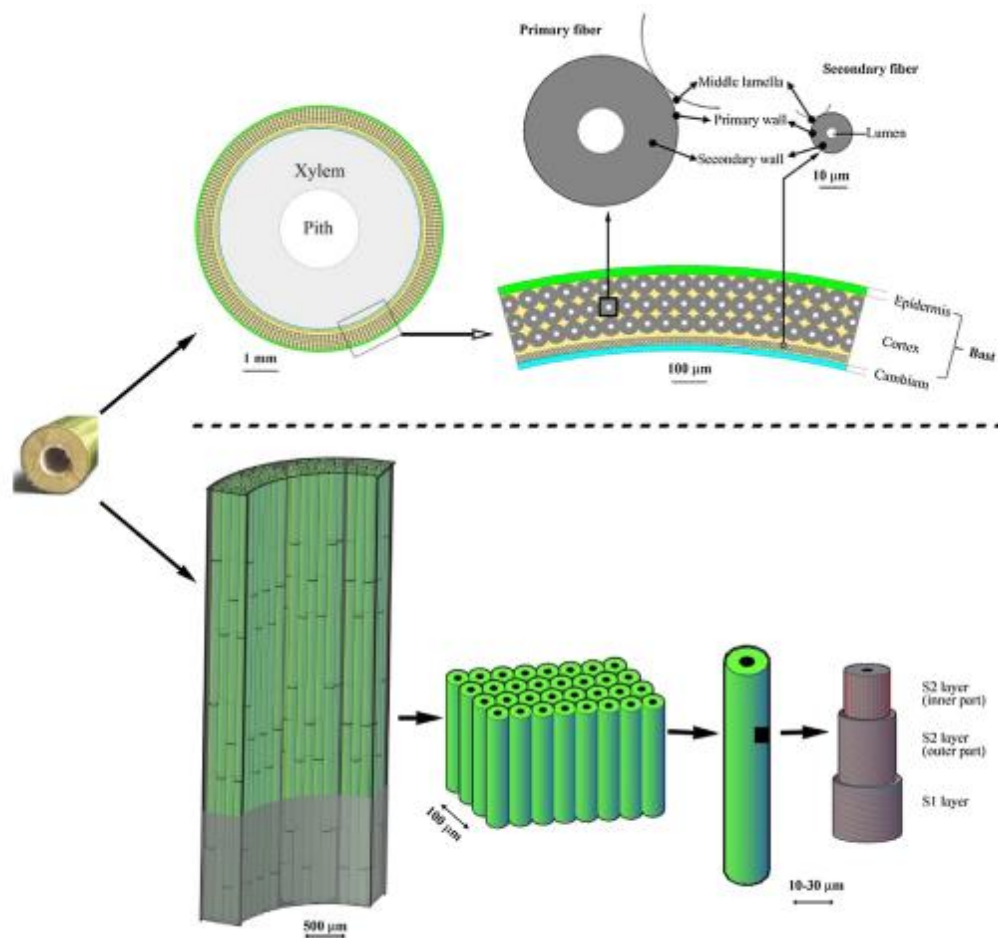


Figura A.1. Estructura de las fibras de cáñamo (Liu, 2017).

Tabla 25. Compilación de propiedades de ciertas fibras naturales y sintéticas (Liu, 2017).

| Fibra            | Densidad [g/cm <sup>3</sup> ] | Elongación [%] | Resistencia a la tracción [MPa] | Módulo de Young [GPa] |
|------------------|-------------------------------|----------------|---------------------------------|-----------------------|
| Bambú            | 0,6-1,1                       | -              | 140-230                         | 11-17                 |
| Banana           | -                             | 3              | 529-914                         | 27-32                 |
| Algodón          | 1,5-1,6                       | 7,0-8,0        | 287-597                         | 5,5-12,6              |
| Linaza           | 1,5                           | 2,7-3,2        | 345-1035                        | 27,6                  |
| Cáñamo           | 1,48                          | 1,6            | 690                             | 70,0                  |
| Piña             | 0,8-1,6                       | 1,6-14,5       | 180-1627                        | 1,44-82,5             |
| Madera           | 1,5                           | -              | 1000                            | 40                    |
| Fibra de vidrio  | 2,5-2,55                      | 2,5            | 2000-3500                       | 73                    |
| Fibra de carbono | 1,4-1,75                      | 1,4-1,8        | 4000                            | 230-240               |

Tabla 26. Composición química de tallos de plantas (Akil *et al.*, 2011).

| Fibra  | Celulosa (%) | Lignina (%) | Otros compuestos (%) |
|--------|--------------|-------------|----------------------|
| Lino   | 71           | 2,2         | 26,8                 |
| Cáñamo | 70-74        | 3,7-5,7     | 20,3-26,3            |

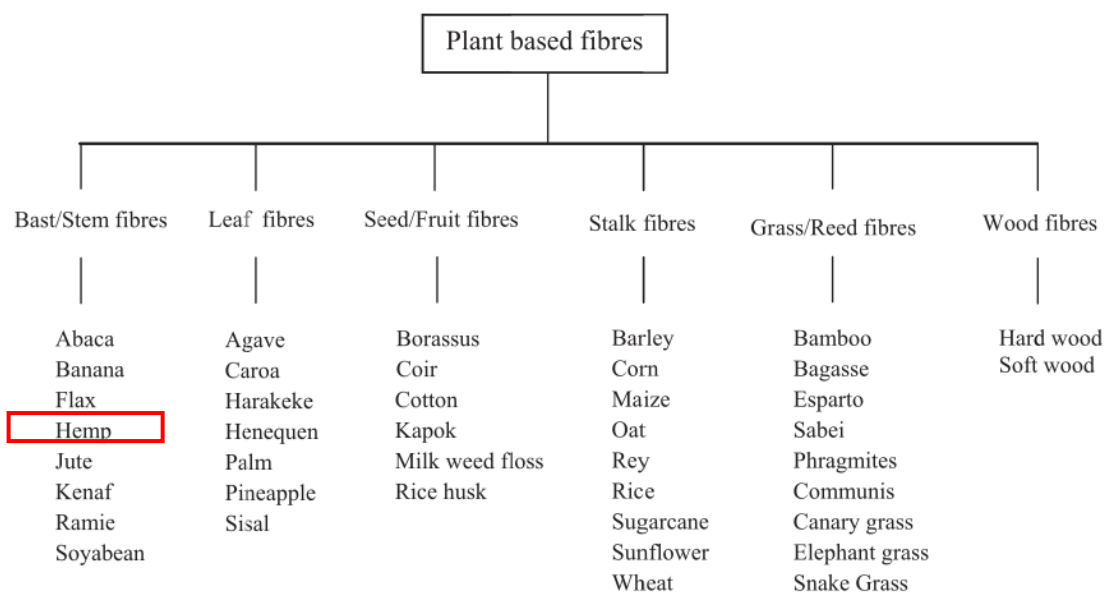


Figura A.2. Clasificación de fibras de plantas obtenidas a partir de distintas secciones de plantas (Ramesh, 2017). Se destaca la fibra de cáñamo, como fibra obtenida a partir de tallos.

## Anexo B. Tabla Estado del Arte.

Tabla 27. Resumen de propiedades de materiales obtenidos en revisión del estado del arte.

| Investigación             | Matriz | Refuerzo                             | % refuerzo                                                              | Método fabricación                                                            | Caracterización                                                       | Resultados                                                                      |
|---------------------------|--------|--------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| Tanase-Opedal (2019)      | PLA    | Lignina soda                         | 20, 40 (205°C),<br>40 (215°C),<br>40 (230°C)                            | Extrusora para filamentos de impresoras 3D (Noztek Xcalibur).                 | TGA + DSC + FTIR + XRD + potencial antioxidante + SEM + Tracción      | Mejor formulación: 40%. Aumentó potencial antioxidante/cm <sup>2</sup> en 50%.  |
| <u>Spiridon, I (2014)</u> | PLA    | Organosolv lignin, Lignoboost lignin | 7 (LO), 7(LB)                                                           | Reómetro de torque, compresión por moldeo.                                    | Climatización artificial, FTIR, DSC, TG/DTG, SEM, Tracción, Impacto,  | LO. Aumento de resistencia al impacto y de estabilidad térmica de PLA.          |
| Sawpan, M (2007)          | PLA    | Fibras de cáñamo                     | 10, 20, 30                                                              | Extrusora de doble tornillo. Moldeo por inyección.                            | DSC, XRD, Tracción, Flexión, Impacto, SEM                             | Formulación con un 30% de fibras. Incrementó 100% módulo de Young, y 30% el TS. |
| Masirek R. (2007)         | PLA    | Fibras de cáñamo < 250 µm            | Con PEG (10%):<br>1, 5, 10, 20, 30.<br><br>Sin PEG:<br>1, 5, 10, 20, 30 | Brabender plasticorder internal mixer. Compresión por moldeo. Aditivo: PEG600 | Microscopía óptica polarizada, SEM, WAXS, DSC, TGA, Tracción, Impacto | Formulación con 20% de fibras alcanzó un mayor módulo de elasticidad.           |

### Anexo C. Tabla de propiedades de probetas con nanotubos de carbono.

Con el propósito de descubrir nuevas aplicaciones a través de la utilización de biopolímeros lignocelulósicos y nanomateriales, se realizó una muestra única a partir de nanotubos de carbono. La denominación de la muestra es N2F20, y consta de una presencia de un 2%p/p de nanotubos de carbono, un 20%p/p de fibras de celulosa, y un 78%p/p de PLA. Sus propiedades mecánicas se muestran en la Tabla 28, y la muestra se expone en la Figura C1.



Figura C.1. Fotografía de muestra N2F20 (elaboración propia).

Tabla 28. Comparación de propiedades teóricas y experimentales de la muestra N2F20 y L15F30.

| Muestra | Categoría    | $\rho_c$<br>[ $\frac{g}{ml}$ ] | $E_{esp}$<br>[GPa] |
|---------|--------------|--------------------------------|--------------------|
| N2F20   | Teórico      | 1,42                           | 25,57              |
|         | Experimental | 1,45                           | 2,06E-04           |
| L15F30  | Teórico      | 1,69                           | 6,68               |
|         | Experimental | 1,76                           | 1,46E-04           |

Se observa un elevado modulo específico para la muestra N2F20, a pesar de que posee una cantidad menor de fibra de celulosa que la muestra L15F30. De hecho, entre valores teóricos, y comparando a ambas muestras, la probeta con nanotubos de carbono representa 3,83 veces la magnitud de la muestra sin nanotubos.

Por otro lado, comparando valores experimentales, la muestra con nanotubos representa 1,41 veces la magnitud de la muestra con lignina.

Es decir, se evidencia la hipótesis proveniente de la regla de las mezclas, en donde un material con una propiedad muy alta, puede transferir hacia el material híbrido, dicha propiedad en proporción a su fracción volumétrica. En este caso, los nanotubos de carbono poseen una densidad relativamente baja (1,4 [g/ml]), y un considerable módulo de Young (950 [GPa]). De esta manera, si se busca diseñar productos con elevado módulo específico, con el fin de reducir material para disminuir recursos y costos de transporte, la utilización de nanomateriales, como los nanotubos de carbono, prometen interesantes resultados, en caso de seguir investigando.

#### **Anexo D. Cálculo de módulo específico teórico y experimental.**

En la Tabla 13 se muestran, para cada una de las 8 muestras, los valores necesarios para calcular el módulo específico teórico. Para aquello, y empleando la Ecuación 10, se requieren obtener los datos del módulo elástico promedio, el cual obtiene promediando el módulo elástico superior con el mínimo, y se divide entre la densidad del compuesto para cada muestra.

A su vez, para obtener la densidad del compuesto, se emplea la Ecuación 7, calculando para ello la densidad del material de relleno  $\rho_r$ , la densidad del material empleado como matriz  $\rho_m$ , y la fracción másica del material de relleno  $M_r$ . La fracción másica se obtiene a partir de la Ecuación 4, y el valor de la densidad del material relleno se obtiene empleando la Ecuación 2 de la regla de las mezclas.

Para conseguir el módulo elástico mínimo y superior, se utilizan las Ecuaciones 8 y 9.

En el caso del módulo específico experimental, se procede, de manera general, de la misma manera que con el módulo específico teórico. La diferencia, radica en que los módulos de elasticidad para cada muestra se estiman a partir de las curvas esfuerzo-deformación, obtenidas en el ensayo de tracción. Se procede de esa manera para calcular los módulos horizontales y verticales de cada muestra, y se promedian. A partir del módulo promedio de cada muestra, se divide entre la densidad del compuesto, y se obtiene el módulo específico. Por último, se señala que para calcular la densidad de compuesto de cada muestra, se mide la masa de la probeta en una balanza digital, y se considera a la densidad del relleno como constante. Para calcular las propiedades mecánicas teóricas de las muestras, como el módulo específico, se utiliza la Tabla 29.



**Anexo E. Fotografías en microscopio de las muestras.**

Tabla 30. Fotografías en microscopio con aumento 4X, 10X, 20X y 50X de la muestra L10F15.

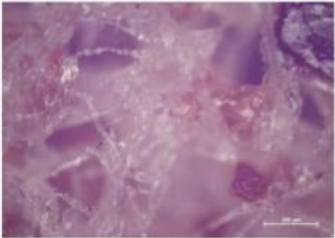
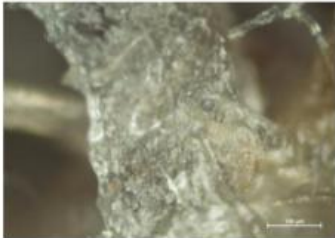
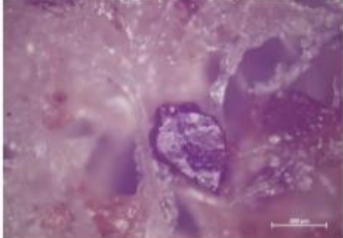
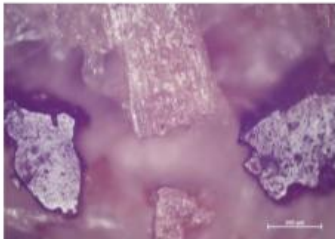
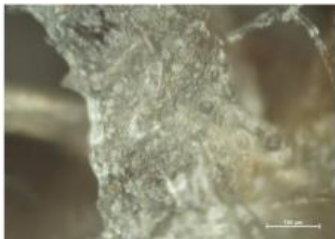
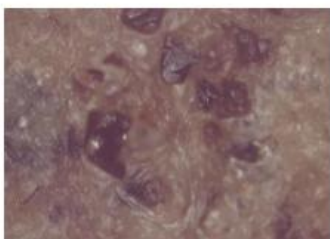
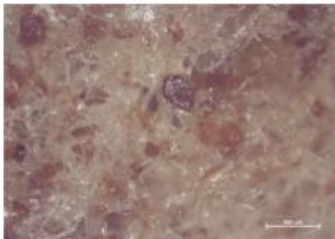
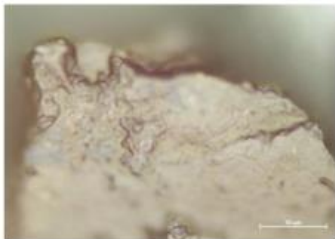
|                                                                                    |                                                                                    |                                                                                     |
|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
|   |   |  |
|   |   |  |
|  |  |                                                                                     |

Tabla 31. Fotografías en microscopio con aumento 4X de la muestra L10F30.

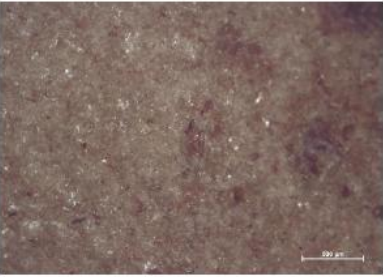
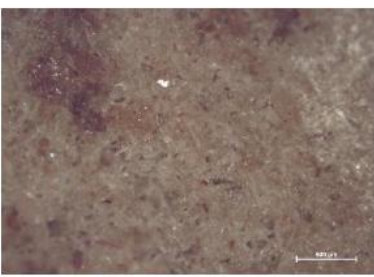
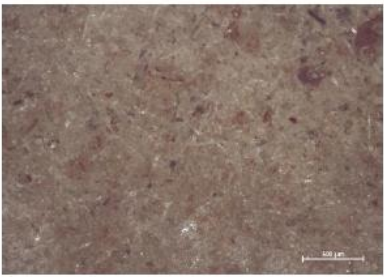
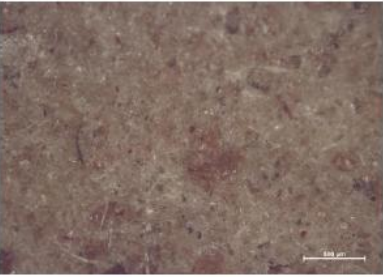
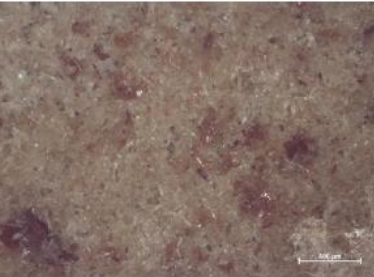
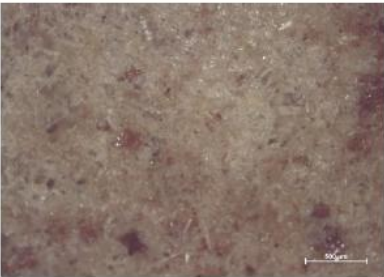
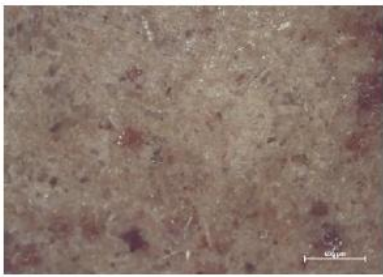
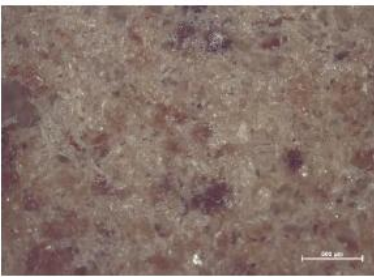
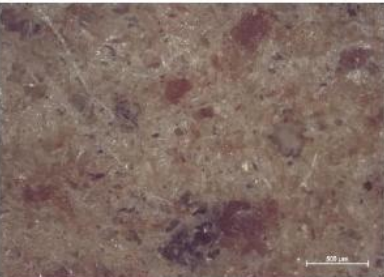
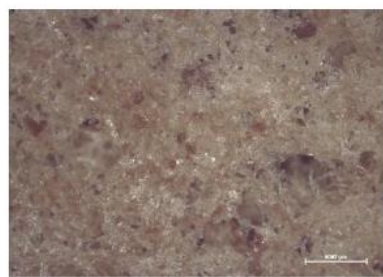
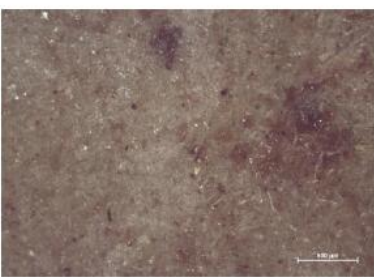
|                                                                                     |                                                                                      |                                                                                      |
|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
|    |    |   |
|    |    |   |
|   |   |  |
|  |  |                                                                                      |

Tabla 32. Fotografías en microscopio con aumento 4X de la muestra L15F15.

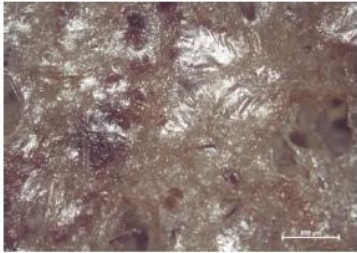
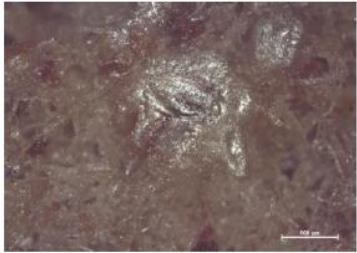
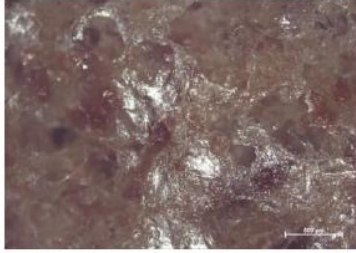
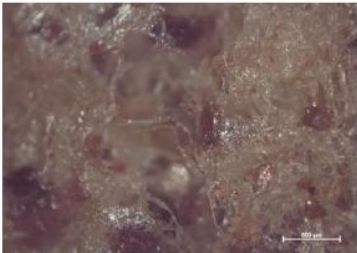
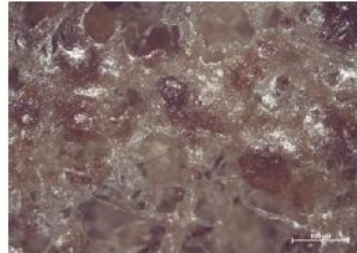
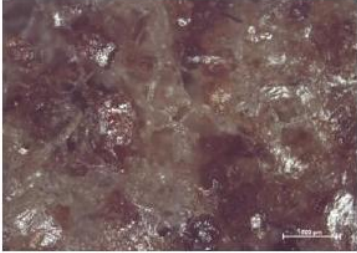
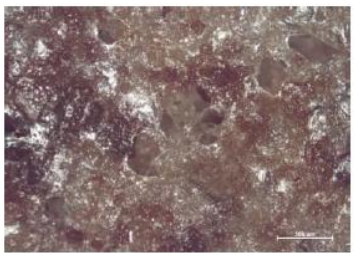
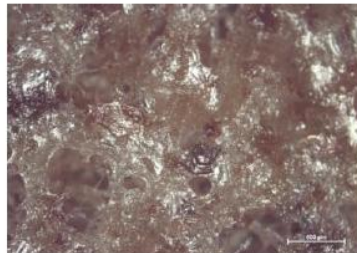
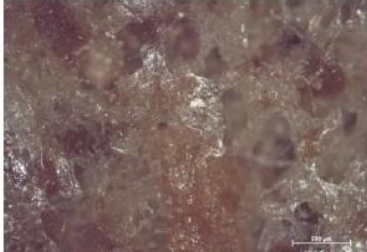
|                                                                                     |                                                                                    |                                                                                      |
|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
|    |   |   |
|    |   |   |
|   |  |  |
|  |                                                                                    |                                                                                      |

Tabla 33. Fotografías en microscopio con aumento 4X de la muestra L15F30.

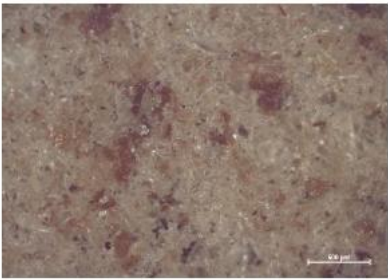
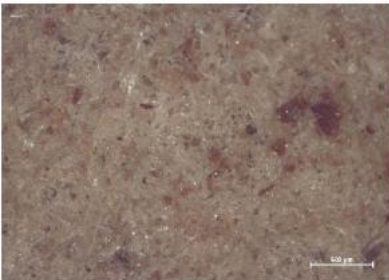
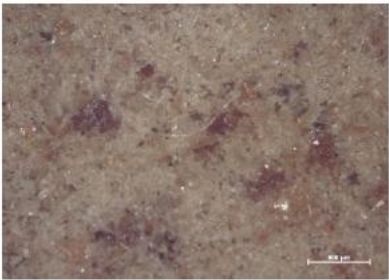
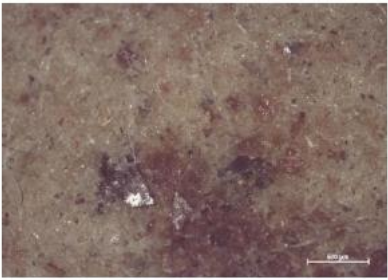
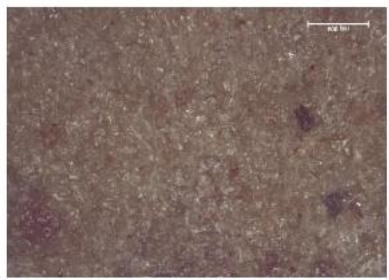
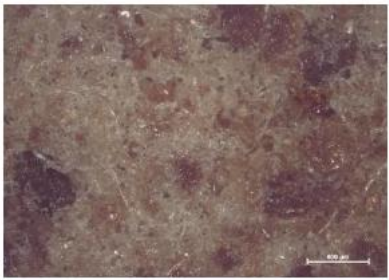
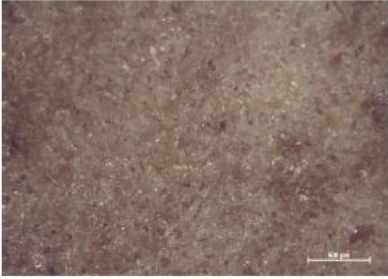
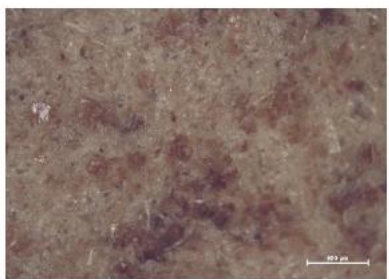
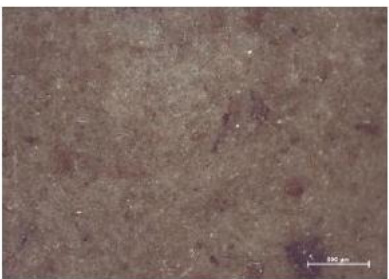
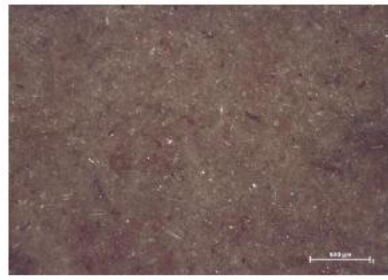
|                                                                                     |                                                                                    |                                                                                      |
|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
|    |   |   |
|    |   |   |
|   |  |  |
|  |                                                                                    |                                                                                      |

Tabla 34. Fotografías en microscopio con aumento 4X de la muestra P10L10F15.

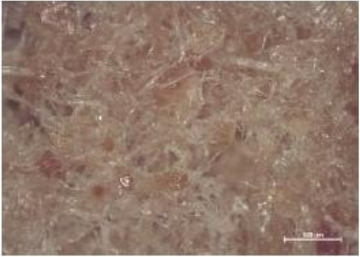
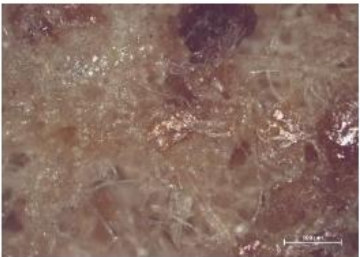
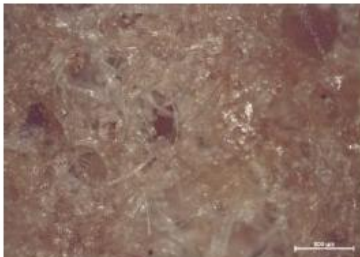
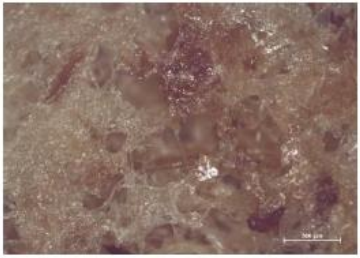
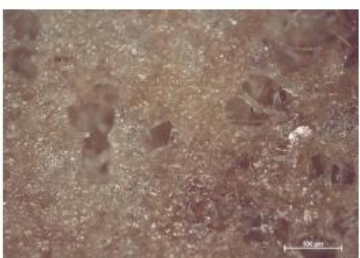
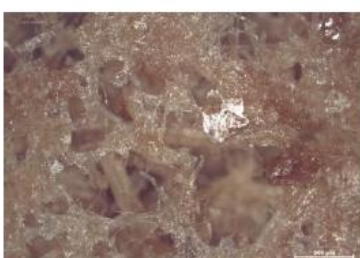
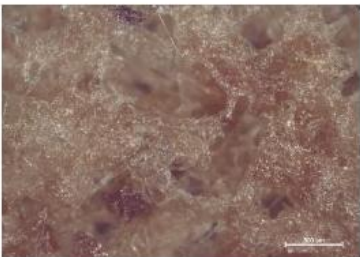
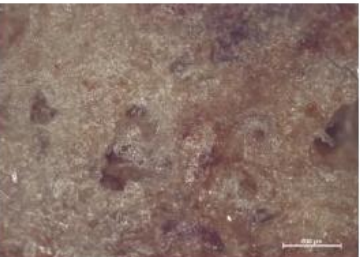
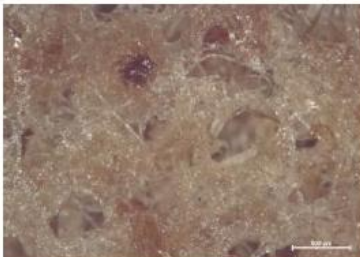
|                                                                                     |                                                                                    |                                                                                      |
|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
|    |   |   |
|    |   |   |
|   |  |  |
|  |                                                                                    |                                                                                      |

Tabla 35. Fotografías en microscopio con aumento 4X de la muestra P10L10F30.

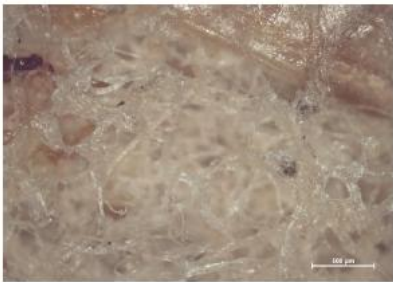
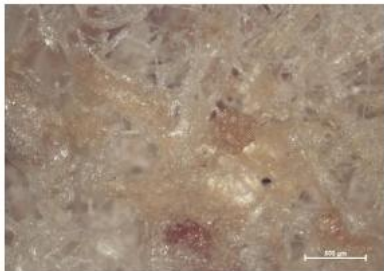
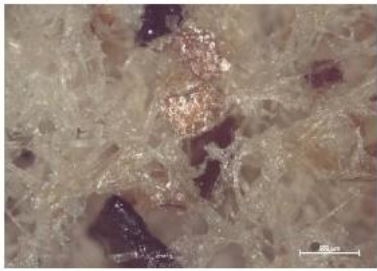
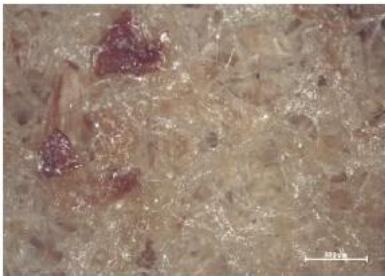
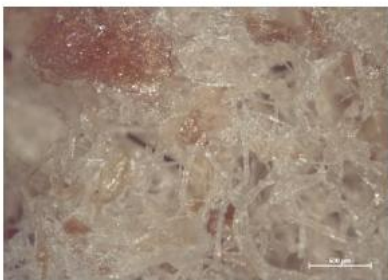
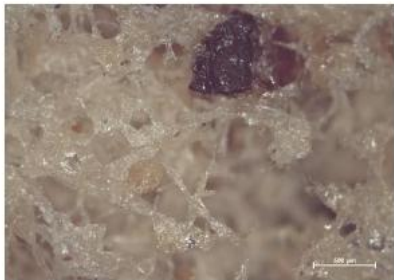
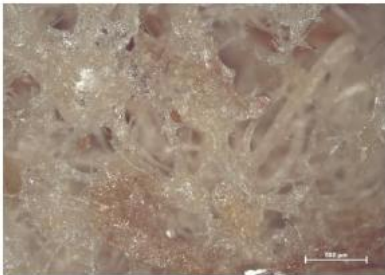
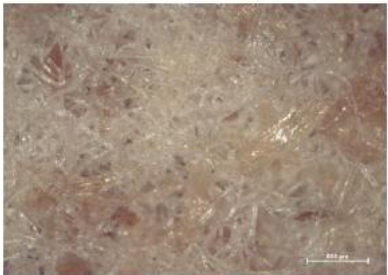
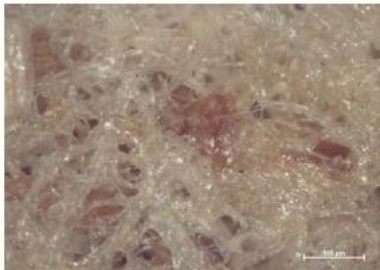
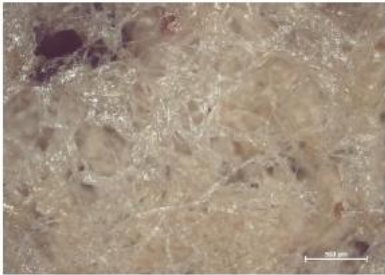
|                                                                                     |                                                                                    |                                                                                      |
|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
|    |   |   |
|    |   |   |
|   |  |  |
|  |                                                                                    |                                                                                      |

Tabla 36. Fotografías en microscopio con aumento 4X de la muestra P10L15F15.

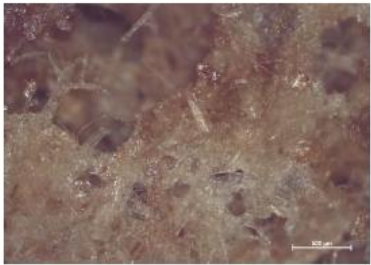
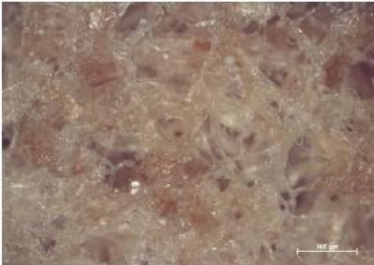
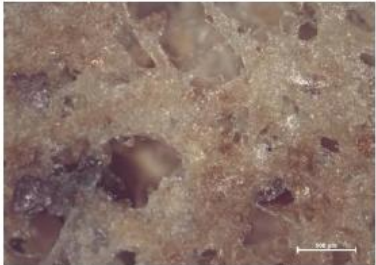
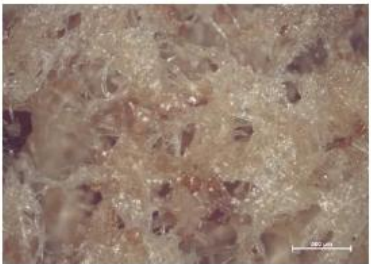
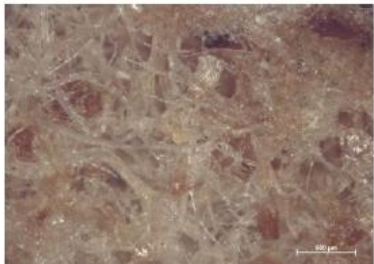
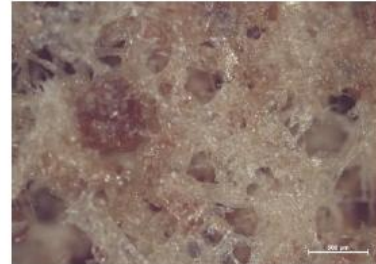
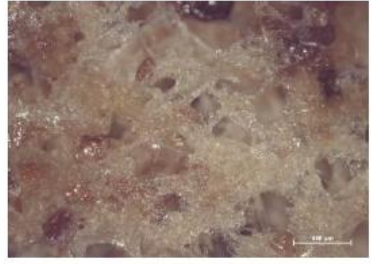
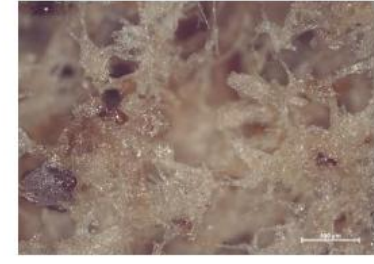
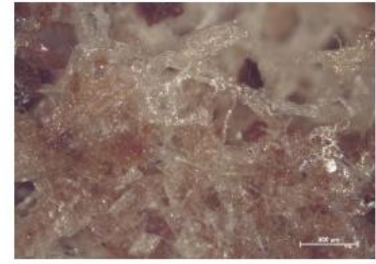
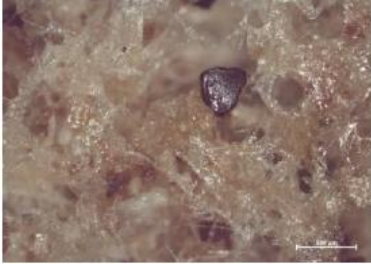
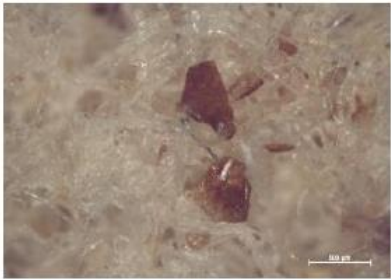
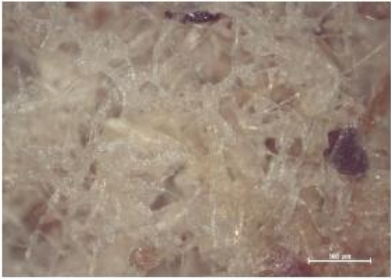
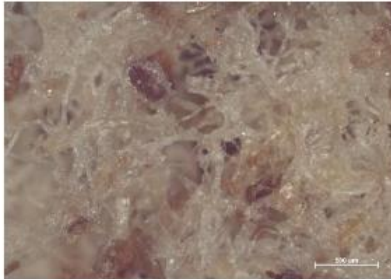
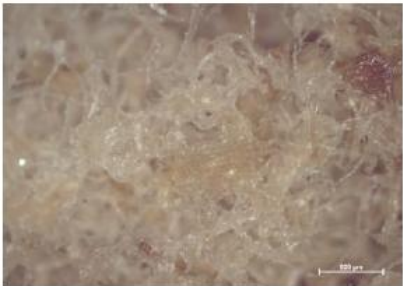
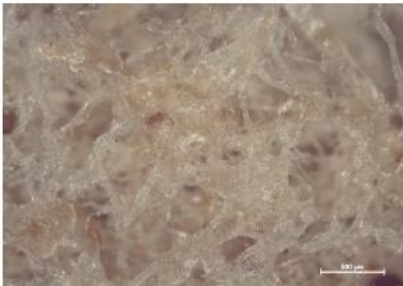
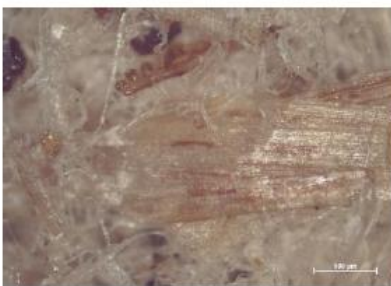
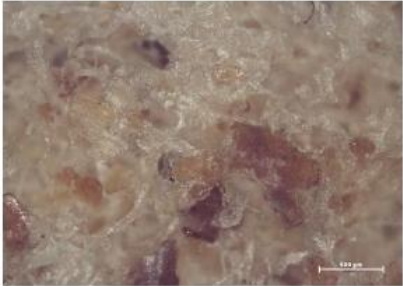
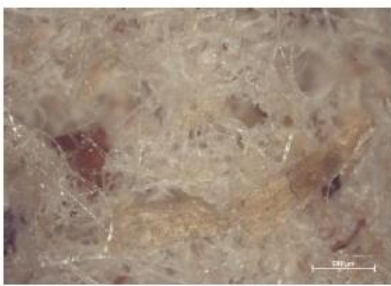
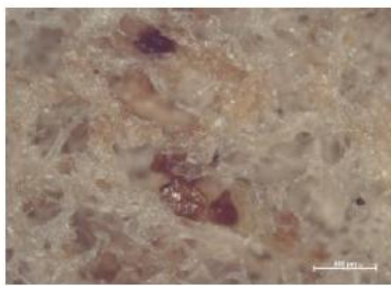
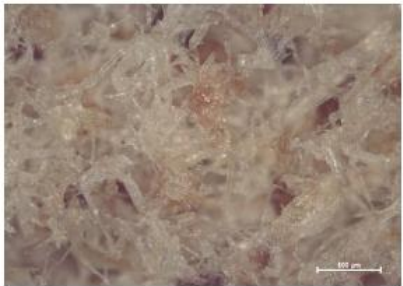
|                                                                                     |                                                                                      |                                                                                       |
|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|    |    |    |
|    |    |    |
|  |  |  |
|  |                                                                                      |                                                                                       |

Tabla 37. Fotografías en microscopio con aumento 4X de la muestra P10L15F30.

|                                                                                     |                                                                                      |                                                                                       |
|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|    |    |    |
|    |    |    |
|  |  |  |
|  |                                                                                      |                                                                                       |

## Anexo F. Propiedades de probetas sometidas a ensayo de tracción.

Tabla 38. Propiedades de probetas sometidas a ensayo de tracción.

| MUESTRAS    |    | ESPESOR [mm] |       |       |       |          | ANCHO [mm] | ÁREA [mm <sup>2</sup> ] | LARGO INICIAL [mm] | Velocidad Mordazas [mm/min] |
|-------------|----|--------------|-------|-------|-------|----------|------------|-------------------------|--------------------|-----------------------------|
|             |    | E1           | E2    | E3    | E4    | Promedio |            |                         |                    |                             |
| PEG L10 F15 | H1 | 2.268        | 1.928 | 2.039 | 1.788 | 2.006    | 5          | 10.029                  | 20                 | 0.4                         |
|             | H2 |              |       |       |       |          |            |                         |                    |                             |
|             | V1 | 2.009        | 2.267 | 1.971 | 1.781 | 2.007    | 5          | 10.035                  | 20                 |                             |
|             | V2 |              |       |       |       |          |            |                         |                    |                             |
| PEG L10 F30 | H1 | 3.163        | 2.874 | 2.428 | 3.086 | 2.888    | 5          | 14.439                  | 20                 | 0.5                         |
|             | H2 |              |       |       |       |          |            |                         |                    |                             |
|             | V1 | 3.863        | 3.748 | 3.604 | 3.152 | 3.592    | 5          | 17.959                  | 20                 |                             |
|             | V2 |              |       |       |       |          |            |                         |                    |                             |
| PEG L15 F15 | H1 | 2.467        | 2.638 | 2.274 | 2.199 | 2.395    | 5          | 11.973                  | 20                 | 0.5                         |
|             | H2 | 2.458        | 2.318 | 2.174 | 1.997 | 2.237    | 5          | 11.184                  | 20                 |                             |
|             | V1 | 2.506        | 3.011 | 2.871 | 2.797 | 2.796    | 5          | 13.981                  | 20                 |                             |
|             | V2 | 2.644        | 2.974 | 2.992 | 2.898 | 2.877    | 5          | 14.385                  | 20                 |                             |
| PEG L15 F30 | H1 | 2.871        | 2.945 | 2.906 | 2.823 | 2.886    | 5          | 14.431                  | 20                 | 0.6                         |
|             | H2 | 3.092        | 3.028 | 2.943 | 2.528 | 2.898    | 5          | 14.489                  | 20                 |                             |
|             | V1 | 3.163        | 2.897 | 3.117 | 3.241 | 3.105    | 5          | 15.523                  | 20                 |                             |
|             | V2 | 2.892        | 2.864 | 2.876 | 3.503 | 3.034    | 5          | 15.169                  | 20                 |                             |
| L15 F15     | H1 | 1.751        | 1.516 | 1.408 | 1.577 | 1.563    | 5          | 7.815                   | 20                 | 0.5                         |
|             | H2 | 1.828        | 1.241 | 1.712 | 1.663 | 1.611    | 5          | 8.055                   | 20                 |                             |
|             | V1 | 1.928        | 1.977 | 1.819 | 1.861 | 1.896    | 5          | 9.481                   | 20                 |                             |
|             | V2 | 1.552        | 1.613 | 1.589 | 1.362 | 1.529    | 5          | 7.645                   | 20                 |                             |
| L15 F30     | H1 | 0.659        | 0.654 | 0.559 | 0.567 | 0.610    | 5          | 3.049                   | 20                 | 0.4                         |
|             | H2 | 0.657        | 0.664 | 0.717 | 0.741 | 0.695    | 5          | 3.474                   | 20                 |                             |
|             | V1 | 0.735        | 0.712 | 0.667 | 1.664 | 0.945    | 5          | 4.723                   | 20                 |                             |
|             | V2 | 0.951        | 0.685 | 0.784 | 1.465 | 0.971    | 5          | 4.856                   | 20                 |                             |
| L10 F15     | H1 | 1.966        | 1.923 | 1.804 | 1.464 | 1.789    | 5          | 8.946                   | 20                 | 0.5                         |
|             | H2 | 2.062        | 1.691 | 1.463 | 1.246 | 1.616    | 5          | 8.078                   | 20                 |                             |
|             | V1 | 2.055        | 1.712 | 1.527 | 1.628 | 1.731    | 5          | 8.653                   | 20                 |                             |
|             | V2 | 1.279        | 1.356 | 1.427 | 1.645 | 1.427    | 5          | 7.134                   | 20                 |                             |
| L10 F30     | H1 | 0.918        | 0.992 | 0.896 | 0.964 | 0.943    | 5          | 4.713                   | 20                 | 0.7                         |
|             | H2 | 0.852        | 0.858 | 0.868 | 1.066 | 0.911    | 5          | 4.555                   | 20                 |                             |
|             | V1 | 0.906        | 0.707 | 0.722 | 0.865 | 0.800    | 5          | 4.000                   | 20                 |                             |
|             | V2 | 0.808        | 0.876 | 0.573 | 1.464 | 0.930    | 5          | 4.651                   | 20                 |                             |
| F20 CNT2    | H1 | 0.817        | 0.772 | 0.502 | 0.977 | 0.767    | 5          | 3.835                   | 20                 | 0.4                         |
|             | H2 | 1.609        | 1.073 | 0.461 | 0.949 | 1.023    | 5          | 5.115                   | 20                 |                             |
|             | V1 | 1.561        | 0.712 | 0.847 | 1.238 | 1.090    | 5          | 5.448                   | 20                 |                             |
|             | V2 | 1.507        | 1.334 | 0.814 | 0.983 | 1.160    | 5          | 5.798                   | 20                 |                             |

Anexo G. Curvas granulométricas del proceso de tamizado de celulosa y lignina.

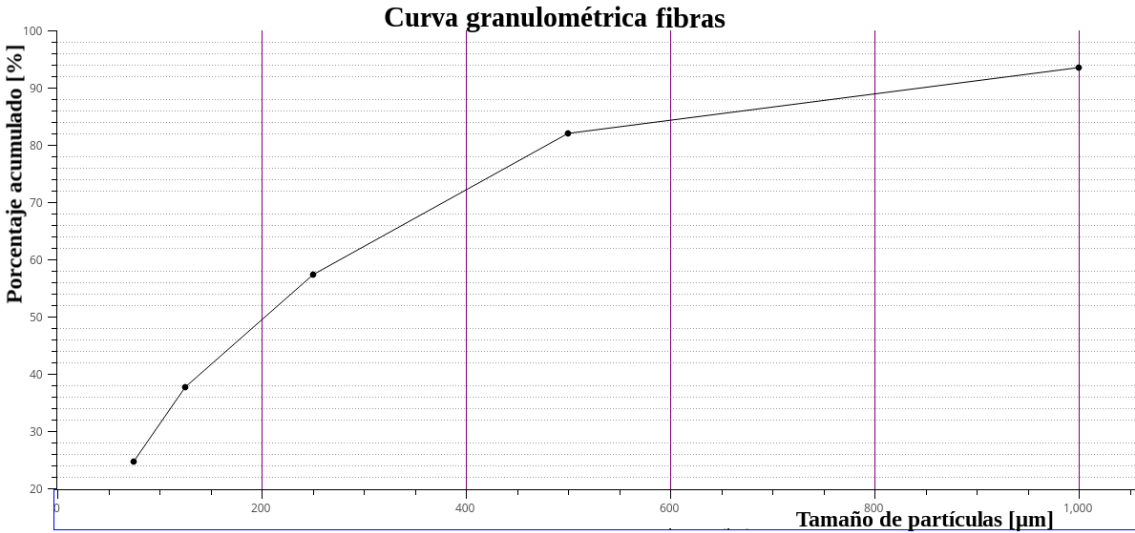


Figura G.1. Curva granulométrica para las fibras de celulosa obtenidas.

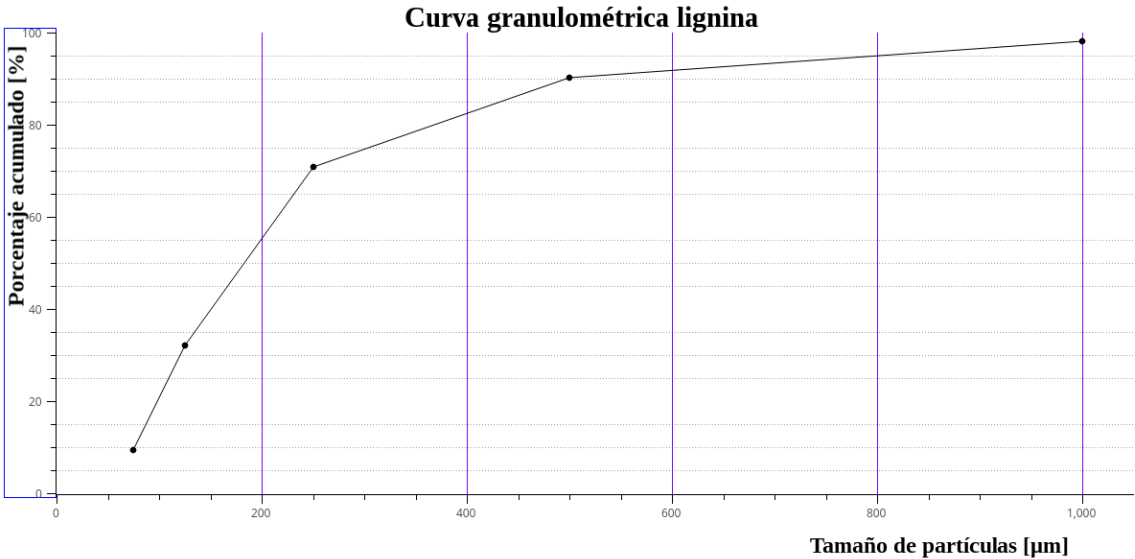


Figura G.2. Curva granulométrica para la lignina obtenida.

Tabla 39. Distribución del tamaño de partículas de una muestra de aserrín de madera de pino (Aguila, 2017).

| Malla<br>[ $\mu m$ ] | Fibras de celulosa |           |           |
|----------------------|--------------------|-----------|-----------|
|                      | $F_a$ [g]          | $F_u$ [g] | $F_u$ [%] |
| 600                  | 0                  | 3,051     | 100       |
| 500                  | 0,439              | 2,612     | 86        |
| 425                  | 0,399              | 2,213     | 73        |
| 200                  | 1,540              | 0,673     | 22        |
| 75                   | 0,523              | 0,15      | 5         |
| 53                   | 0,150              | 0         | 0         |