



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MÉXICO  
FACULTAD DE ARQUITECTURA Y DISEÑO



DOCTORADO EN DISEÑO  
Campo de conocimiento: Patrimonio, ambiente y  
Tecnología

**“USO Y APLICACIÓN DE LA SOROSIS DE (*Ananas comosus*)  
COMO BIOCOMPUESTO EN LA INDUSTRIA DE LA  
CONSTRUCCIÓN”**

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
**DOCTOR EN DISEÑO**

**PRESENTA**

**M. en Dis. Gustavo Jesús Islas Valverde**

**Comité Tutor:**



**Director:**  
Dr. Juan Carlos Arteaga Arcos  
**Tutores adjuntos:**  
Dr. Silverio Hernández Moreno  
Dra. Lorena Romero Salazar  
Dr. Carlos Santiuste Romero  
Dra. Lucila Herrera Reyes

**Toluca, Estado de México, julio 2020**

**“USO Y APLICACIÓN DE LA SOROSIS DE (*Ananas comosus*) COMO BIOCOMPUESTO EN LA INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN”**

# ÍNDICE

I. RESUMEN .....	9
ABSTRACT .....	10
INTRODUCCIÓN .....	11
II. IMPORTANCIA DEL PROBLEMA.....	12
2.1 Justificación .....	16
2.2 Objetivos.....	17
2.3 Hipótesis.....	18
Introducción.....	18
3.1 Análisis macro y microdimensional del subproducto .....	22
3.2 Valorización de <i>Ananas comosus</i> en el sector constructivo .....	24
3.3 Revisión de la literatura .....	25
3.3.1 Conceptos de productos sostenibles de origen biológico.....	25
3.3.1.1 Biocompuestos y biopolímeros.....	27
3.3.1.2 Polímeros biodegradables.....	28
3.3.1.3 Los polisacáridos.....	29
3.3.1.4 Almidón termoplástico .....	29
3.3.1.5 Biopolímeros eco-eficientes para la construcción.....	31
3.4 Diseño del biocompuesto.....	32
3.4.1 Factores que influyen en el procesamiento de las fibras vegetales .....	39
3.4.1.1 Humedad.....	41
3.4.1.2 Contenido y tipo de fibra .....	41
3.4.1.3 Superficie de la fibra vegetal .....	42
3.4.1.4 Tecnologías de procesamiento para termoplásticos reforzados con fibra vegetal.....	43
3.4.1.5 Factores de calidad en ambientes interiores .....	47
IV. PROCESO METODOLÓGICO Y DE DISEÑO .....	47
Introducción.....	47
4.1 Diseño Experimental.....	49
4.1.1 Materiales y métodos .....	49
4.1.2 Pretratamientos de la cáscara de piña .....	49
4.1.2.1 Lavado .....	50

4.1.2.2 Molienda.....	50
4.1.2.3 Deshidratación .....	50
4.1.3 Matriz biopolimérica .....	51
4.1.4 Proceso de laminado,.....	56
.....	58
.....	58
.....	58
4.2.2 Método de prueba estándar para propiedades de tracción de plásticos (ASTM D638-10). .....	60
4.3 Análisis Microscópico.....	62
4.4 Determinación de absorción de agua .....	64
4.5 Determinación de la conductividad térmica .....	65
4.6 Propuesta final de diseño .....	67
V. DESARROLLO METODOLÓGICO PARA EL ECODISEÑO .....	70
Introducción.....	70
5.1 Análisis de Ciclo de vida (ACV) .....	73
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	77
CONCLUSIONES.....	86
ANEXOS .....	88
REFERENCIAS.....	95

## Listado de Figuras

<b>Figura 3.1.</b> Proceso productivo de la cadena de valor de la piña y sus subproductos ..	20
<b>Figura 3.2.</b> Dimensionamiento (macro y micro) de la cáscara de piña .....	23
<b>Figura 3.3.</b> Composite con fibras de cáscara de piña como carga. ....	23
<b>Figura 3.4.</b> Concepto de “sostenible para productos de origen biológico .....	26
<b>Figura 3.5.</b> Conformado de los laminados con cáscara de piña triturada .....	33
<b>Figura 3.6.</b> Composite híbrido de cáscara de piña .....	36
<b>Figura 3.7.</b> Clasificación de fibras según su forma .....	42
<b>Figura 4.1.</b> Rutas sugeridas para el Biodiseño del biocompuesto .....	53
<b>Figura 4.2.</b> Propuesta geométrica de Diseño industrial .....	55
<b>Figura 4.3.</b> A, B, C, D. Moldes utilizados para el método de termocompresión en placa .....	56
<b>Figura 4.4.</b> Moldeo por compresión, prensa hidráulica MEGA KSC-10A Presión de 50 Kg/cm <sup>2</sup> .....	57
<b>Figura 4. 5.</b> Diseño de moldes circulares de prueba de acero inoxidable para termo-compresión.....	58
<b>Figura 4.6.</b> Moldes circulares (usando PLA como matriz biopolimérica .....	58
<b>Figura 4.7.</b> Detalle transversal del conformado térmico del biocompuesto .....	59
<b>Figura 4.8.</b> A, B, detalle de probetas .....	60
<b>Figura 4.9.</b> A, B. Cáscara de piña particulada y tamizada en malla 250, imagen en 4X, Microscopio biológico Olympus BX51. ....	62
<b>Figura 4.10.</b> Estructura del Bipolímero/Cáscara de piña imagen tomado con estereoscopio .....	63
<b>Figura 4.12.</b> Propuesta de aplicación en interiores como panel divisorio. ....	67
<b>Figura 4.13.</b> Propuesta de aplicación como recubrimiento.....	68
<b>Figura 4.14.</b> Propuesta de aplicación como recubrimiento.....	68
<b>Figura 5.1.</b> Impacto ambiental de la construcción. ....	71
<b>Figura 5.2.</b> Proceso de evaluación del ciclo de vida.....	74
<b>Figura 5.3.</b> De la cuna a la puerta (Cradl to gate).....	74
<b>Figura 5.4.</b> Ciclo de vida del producto. ....	75
<b>Figura 5.5.</b> Proceso de obtención del biocompuesto.....	76
<b>Figura 5.6.</b> Cáscara de piña Ananas comosus (fruto y cáscara molida).....	77
<b>Figura 5.7.</b> Muestras T1, T2, T3 y T4 de experimentación .....	82
<b>Figura 5.8.</b> Estados metaestables de PLAs semi cristalino .....	83
<b>Figura 5.9.</b> Categoría de impacto ambiental del biocompuesto con respecto a la acidificación expresada en Kg de SO <sub>2</sub> eq.....	89

## Listado de tablas

<b>Tabla 1</b> .....	15
Situación de la producción de piña al 31 de diciembre de 2019.....	15
<b>Tabla 2</b> .....	19
Composición química proximal de la cáscara de piña fresca y seca.....	19
<b>Tabla 3</b> .....	21
Ventajas y limitaciones de los residuos agrícolas .....	21
<b>Tabla 4</b> .....	24
Beneficios de la valorización de la cáscara de piña. ....	24
<b>Tabla 5</b> .....	26
Origen de los plásticos biobasados y biodegradables.....	26
<b>Tabla 6</b> .....	35
Clasificación de los composites basados en materia prima, tamaño de partículas y densidad.....	35
<b>Tabla 7</b> .....	39
Criterios que afectan la selección de productos hechos de fibras naturales en materiales compuestos. ....	39
<b>Tabla 8</b> .....	40
Criterios tomados en cuenta para el composite de cáscara de piña. ....	40
<b>Tabla 9</b> .....	43
Técnicas de procesamiento para compuestos poliméricos. ....	43
<b>Tabla 10</b> .....	46
Fibras usadas para biocompuestos con PLA, por los métodos de compresión e inyección. ....	46
<b>Tabla 11</b> .....	47
Metodologías y herramientas consideradas en el proyecto .....	47
<b>Tabla 12</b> .....	69
Propiedades de los materiales compuestos con base en los diferentes sectores de aplicación .....	69
<b>Tabla 13</b> .....	78
Caracterización de la matriz biopolimérica de cáscara de piña.....	78
<b>Tabla 14</b> .....	79

Resultados conductividad térmica ( $\lambda$ ), densidad ( $\text{g/m}^3$ ), espesor (cm), de diferentes materiales, requerido para lograr un valor u de $0.3\text{W} / \text{m}^2\text{K}$ .....	79
<b>Tabla 15</b> .....	80
PRUEBA 1(Usó de Arcilla Old mine #4) .....	80
<b>Tabla 16</b> .....	80
Componentes de la matriz biopolimérica .....	80
<b>Tabla 17</b> .....	80
Experimentación con otros componentes .....	80
PRUEBA T1 .....	80
<b>Tabla 18</b> .....	83
Comparación de los principales indicadores de impacto ambiental. ....	83
<b>Tabla 19</b> .....	85
Análisis comparativo del ciclo de vida ( <i>LCA</i> ) de materiales de aislamiento térmico, CTGR significa de la cuna a la tumba, CTGA significa de la cuna a la puerta. ....	85
<b>Tabla 20</b> .....	90
Porcentaje de azúcares en matriz biopolimérica de cáscara de piña concentrada y sin concentrar. ....	90

### Listado de Gráficas

<b>Gráfica 1.</b> Distribución por sectores de la producción de plásticos en México .....	14
<b>Gráfica 2.</b> Usos de la cáscara de piña .....	21
<b>Gráfico 3.</b> Sistema de coordenadas de materiales bioplásticos .....	31
<b>Gráfica 4.</b> Pérdida de peso de la cáscara de piña con respecto al tiempo .....	51
<b>Gráfica 5.</b> Concentración por evaporación de la matriz biopolimérica.....	52
<b>Gráfica 6.</b> Esfuerzo vs deformación, biocompuesto /PLA 70%.....	61
<b>Gráfica 7.</b> Resultados de tensión para la segunda formulación que incluye 30% de PLA .....	61
<b>Gráfica 8.</b> Determinación de absorción de humedad en muestras con 25 % PLA. ....	65
<b>Gráfica 9.</b> Valoración del impacto para $1\text{m}^2$ de panel de piña .....	88

## **“USO Y APLICACIÓN DE LA SOROSIS DE (*Ananas comosus*) COMO BIOCOMPUESTO EN LA INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN”**

*Un diseñador tiene que aspirar generalmente a lograr la solución óptima en el sentido de obtener el máximo beneficio con el mínimo empleo de material, dentro de los límites de resistencia, rigidez y estabilidad. El resultado será la eficiencia, combinada idealmente con la elegancia y la economía*

Hunt, 2003 citado en Balmond [1] .

## I. RESUMEN

Hoy en día, existe tendencia por el uso de subproductos residuales de origen vegetal en el área de la construcción, mismos que bajo pretratamientos específicos como el secado y molienda mecánica pueden ser llevados a la generación de co-productos útiles en la edificación. Estas prácticas se relacionan con proponer nuevas alternativas de materiales con menor índice de contaminación. El objetivo principal de este proyecto consistió en diseñar un biocompuesto para la industria de la construcción a partir de fibras de sorosis de piña y una matriz polimérica bio-basada en polisacáridos, arcilla y aditivos. La metodología empleada se integró a partir del concepto de ecodiseño y la herramienta de Diseño ambientalmente integrado (dAI), esto conllevó a trabajar en un modelo cíclico en el que la cáscara de piña fue recuperada y reincorporada a un proceso ecoeficiente, tomando en cuenta normativas de (Tensión ASTM D638-10, absorción de agua, conductividad térmica e interperismo y flamabilidad). Por otro lado, se tomaron en cuenta referentes (poliestireno, corcho) cuya comparativa con el biocompuesto se basó en los tipos de procesos, gastos energéticos y disponibilidad de la materia prima, con el uso de normativas EPD (Environmental Product Declaration). Las ventajas se vieron reflejadas en los ecoindicadores del análisis de ciclo de vida (ACV). Pese a que el GWP (*Global*

*Warming Potential*) resultó ligeramente aumentado, se propuso llevar a cabo algunos cambios en cuanto al tipo de arcilla elegida a partir de una fuente más cercana y con características similares. Es así como el subproducto cáscara de piña se propone como una fuente más para la generación de materiales alternativos en la diversidad y conservación de los recursos e incluso su rentabilidad ya que estos son de bajo costo. Por lo tanto, la ecoefectividad representa un paradigma actual para el diseño del mundo cuya perspectiva permea hacia los materiales alternativos, su ciclo de vida y la forma en que se relacionan con la naturaleza.

**Palabras clave:** *Ananas comosus*, Biocompuestos, Construcción.

## ABSTRACT

Today, there is a trend for the use of residual by-products of vegetable origin in the construction area, which under specific pre-treatments such as mechanical drying and grinding can be used to generate useful co-products in buildings. These practices are related to proposing new alternatives of materials with a lower contamination rate. The main objective of this project was to design a biocomposite for the construction industry from pineapple sorosis fibers and a bio-based polymer matrix based on polysaccharides, clay and additives. The methodology used was integrated from the ecodesign concept and the Environmentally Integrated Design (dAI) tool, this led to working on a cyclical model in which the pineapple peel was recovered and reincorporated into an eco-efficient process, taking into account regulations de (ASTM D638-10, water absorption, thermal conductivity and interperism and flammability). On the other hand, references (polystyrene, cork) were taken whose comparison with the biocomposite was based on the types of processes, energy costs and availability of the raw material, with the use of EPD (Environmental Product Declaration) regulations. The advantages were reflected in the ecoindicators of the life cycle analysis (LCA). Although the GWP (Global Warming

Potential) was slightly increased, it was proposed to carry out some changes regarding the type of clay chosen from a closer source and with similar characteristics. This is how the pineapple peel by-product is proposed as one more source for the generation of alternative materials in the diversity and conservation of resources and even their profitability since these are low cost. Therefore, eco-effectiveness represents a current paradigm for the design of the world whose perspective permeates alternative materials, their life cycle and the way they relate to nature.

**Keywords:** *Ananas comosus*, Biocomposites, Construction.

## INTRODUCCIÓN

La presente investigación considera a través de un primer apartado, la importancia del Diseño de materiales alternativos generados a partir de subproductos residuales con potencial para su aprovechamiento como co-productos en la industria de la construcción, como caso particular se estudian aquellos subproductos derivados de la biomasa vegetal, cuya tendencia es minimizar los índices de contaminación presentados por los materiales de construcción convencionales, en este sentido, se considera la cáscara de piña por su alta disponibilidad y bajo costo en México.

En un segundo apartado se aborda la problemática existente en la industria de la construcción, al investigar los impactos generados por materiales convencionales y la importancia de considerar el uso de materiales alternativos. También se justifica el uso y aprovechamiento de la biomasa generada por el fruto de la piña y se plantean las estrategias a seguir para cubrir los objetivos.

En el apartado tres se resalta el subproducto residual (cáscara de piña) como principal componente del biocompuesto y se expone su uso en otras áreas de aplicación que incluyen de igual manera estudios de investigación previos que funcionan como soporte referencial, también se considera la visión multidisciplinaria del Diseño al

converger con otras disciplinas de la Ciencia como la Biología y la Biotecnología, quienes contribuyen a explicar el comportamiento del biocompuesto a través de ópticas macro y micro dimensionales, que definen el diseño geométrico óptimo para el correcto desempeño de las funciones de aislamiento térmico, en donde el estudio conformacional de las fibras vegetales en conjunción con la matriz del biopolímero se ve proyectado hacia la interfase biocompuesto - entorno.

En el apartado cuatro se aborda el desarrollo metodológico conformado por una serie de pretratamientos de la biomasa, y su incorporación a procesos ecoeficientes, así como las pruebas necesarias de absorción de agua, mecánicas (tensión) y conductividad térmica basadas en normativas de la Asociación Americana de Ensayo de materiales (ASTM), con el objeto de obtener un material cuyo uso represente ventajas como bajo costo, eficiencia energética y confort térmico.

En el apartado cinco, se considera la reducción de costos, mejora del producto y su desempeño a nivel ambiental, a través del análisis de ciclo de vida (ACV) en comparativa con EPD's establecidas en la literatura de materiales convencionales para la construcción, así mismo, también se presentan y discuten los resultados obtenidos para llegar a la conclusión y análisis prospectivo del producto.

Finalmente, se determina la importancia del entorno material, como parte del sistema y función del producto en la recuperación de una gran cantidad de materia y energía.

## II. IMPORTANCIA DEL PROBLEMA

El diseño de materiales, ha adquirido gran relevancia sobre todo en la atención a problemáticas de impacto ambiental y en el ámbito de la industria de la construcción en México ya que el ciclo de vida de los materiales requiere de la implementación de estrategias que minimicen los impactos producidos desde su extracción hasta su

disposición final. En este sentido, el Diseño de materiales biocompuestos representa una alternativa para abordar la problemática desde una perspectiva ecológica e interdisciplinar, al integrar los diferentes saberes, tanto tecnológicos como sociales, en aras de la generación de nuevos materiales.

Durante la implementación de estrategias que convergen con la panorámica del Diseño se ha creado una sinergia muy interesante con otras áreas del conocimiento como la Biología y la Biotecnología, lo que trae ventajas para el Diseño, como: la optimización de la energía durante el desarrollo de los biocompuestos y la posibilidad de su inclusión en metodologías integrales, es decir, con el uso y selección de materiales sostenibles en la industria de la construcción, se contribuye a minimizar los impactos negativos al medio ambiente [2].

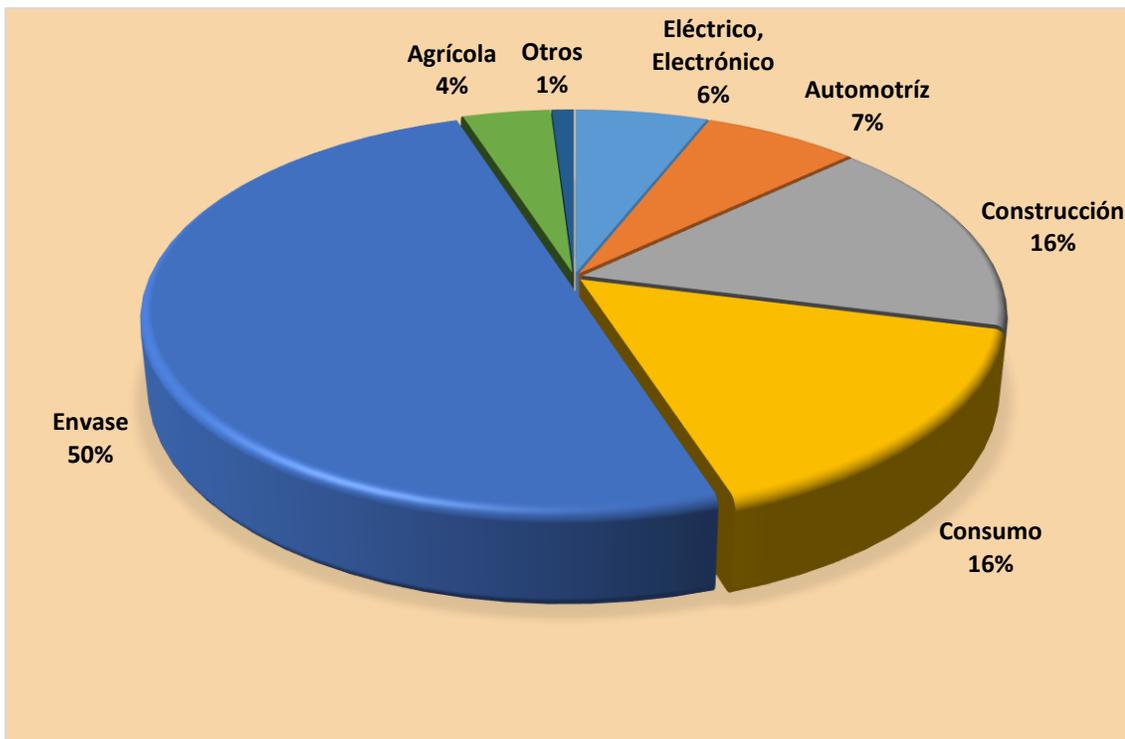
Aunque los materiales compuestos a partir de fibras sintéticas (fibras de vidrio, carbono y aramidas), son materiales de alto rendimiento, estas liberan altas cantidades de CO<sub>2</sub> a la atmósfera durante su combustión, propiciando lo que se conoce como efecto invernadero<sup>1</sup>, también éstos para degradarse experimentan cambios significativos en su estructura química bajo condiciones ambientales específicas, inducidas por efectos del calor, rayos ultravioleta, o biológicamente, haciendo más atractivas a las fibras naturales por sus beneficios ambientales y en cuanto a costos [3]. Las fibras naturales, son de bajo costo, ligeras, tienen propiedades de fácil separación, de recuperación de la energía, neutralización de CO<sub>2</sub>, biodegradabilidad, reciclables y de ello su interés. Con base a estas características la industria automotriz, de la construcción y equipamiento de casas se interesa en ellas [4].

Según Majewski y Błędzki [4] los principales argumentos para el uso de fibras naturales son: menos costo que las fibras de vidrio o carbón, menor densidad, reducción significativa en el peso, menor abrasión (cuidado de las herramientas de moldear), buena insonorización y aislamiento térmico, aspectos ecológicos, como su capacidad de biodegradación una vez terminada su vida útil. Por ello, la aplicación de las fibras para reforzar los plásticos tiene una tendencia continua.

---

<sup>1</sup> Efecto invernadero: mecanismo por el cual la atmósfera de la Tierra se calienta, mientras más gases tipo invernadero se encuentren en la atmósfera como el CO<sub>2</sub>, mayor será la temperatura del planeta. Fuente: (Sueker, 2006, pág. 3).

Hoy en día los plásticos se han convertido en un elemento esencial de la vida moderna, en 2012, la producción de plásticos a nivel mundial fue de 288 millones de toneladas, con una tasa de crecimiento de 2.86% según datos del Banco Mundial. Por tipo de uso, la industria de la construcción ocupa el segundo lugar con 20.3% del total [5]. En México la construcción ocupa el 16% de los plásticos de la demanda total por sector anualmente, como lo indica la **Gráfica 1**.



**Gráfica 1.** Distribución por sectores de la producción de plásticos en México [6].

Los polímeros de origen fósil presentan alta durabilidad bajo condiciones anaeróbicas como aeróbicas por lo que contribuyen a los crecientes problemas de eliminación de residuos y aun mejorando las tasas de reciclaje, no se ha conseguido contrarrestar los problemas de concentración de contaminantes [7].

En la actualidad el mal manejo forestal ha llevado a una reducción significativa de los bosques en medio de demandas crecientes, por lo que se debe considerar el uso de

otras fuentes naturales para la producción de paneles. El uso de fibras de origen vegetal como materiales de carga, puede mejorar las propiedades mecánicas del material compuesto, además contribuiría a reducir las proporciones de polímeros y con ello la minimización de los costos. Aunado a ello, el adicionar fibras vegetales a una matriz plástica, mejora la capacidad de biodegradación del material compuesto, cosa que se vería reflejada una vez terminada la vida útil del producto.

Se plantea, el uso biopolímeros reforzados con fibras de origen natural sobre todo aquellas que provienen de residuos agroindustriales como los obtenidos a partir de la cáscara de piña. En donde, el fruto cumple con una función primaria al aprovecharse la pulpa y por otro lado los residuos generados durante su procesado son aprovechados como materiales fibrosos.

La producción de piña en México, es de 945,210 toneladas (FAOSTAT, 2019) ocupa el noveno lugar a nivel mundial en producción de piña, según datos de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), lo cual ha convertido este sector en una importante fuente de ingresos. En la **Tabla 1**, se muestran los principales estados productores de piña en México:

**Tabla 1**

Situación de la producción de piña al 31 de diciembre de 2019.

Estado	Superficie (ha)			Produccion (ton)	Rendimiento (ton/ha)
	sembrada	cosechada	siniestrada	obtenida	obtenido
CAMPECHE	62	51		914	17.926
COLIMA	431	431		26,328	61.085
CHIAPAS	357	357		7,765	21.75
GUERRERO	46	46		545	11.72
HIDALGO	8	6		286	52
JALISCO	545	545		36,364	66.696
MEXICO	17	17		142	8.35
NAYARIT	2,075	1,556		53,609	34.463
OAXACA	2,065	2,060		145,417	70.574
QUINTANA ROO	992	917		33,658	36.704
TABASCO	1,694	1,580		56,689	35.879
TAMAULIPAS	19	10		232	24.378
VERACRUZ	35,868	14,904	101	686,783	46.08
YUCATAN	4	4		160	40
<b>TOTAL</b>	<b>44,183</b>	<b>22,484</b>	<b>101</b>	<b>1,048,892</b>	<b>46.651</b>

---

Datos Preliminares.

Fuente: Elaborado por el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2019).

## 2.1 Justificación

Hoy en día, debido a los impactos ambientales producidos por los materiales de la construcción se ha buscado el desarrollo y caracterización de materiales alternativos más ecoeficientes, sobre todo en el área de los prefabricados quienes representan el 20.58 % del consumo energético, a nivel mundial las obras civiles y la construcción consumen el 60% de los recursos extraídos de la litosfera (Mercader, Olivares, & Ramírez de Arellano, 2012, p. 568) aunado a ello, la incidencia de las emisiones de CO<sub>2</sub> también son muy notables.

A la par del desarrollo de materiales alternativos, como los biopolímeros reforzados con fibras vegetales, se pueden obtener beneficios de tipo ambiental, tal es el caso de los paneles *sándwich*, los cuales pueden permitir el ahorro de combustible por su bajo peso [9], los subproductos residuales de la industrialización de la piña constituyen entre un 50 y un 65% de la fruta, de los cuales el 12% es la corona, 9% tallo de la piña (corazón) y 32 % de la cáscara [10].

Los efectos de los subproductos de procesamiento de piña sobre el suelo, están relacionados principalmente a las prácticas de enterramiento de éstos sin tratamiento previo. A causa de sus características bioquímicas, estos residuos poseen una buena capacidad de degradación natural; sin embargo, la falta de controles técnicos y de consideraciones sobre la capacidad de carga del sitio puede generar serios problemas por la acción de los líquidos generados por la lixiviación, los cuales poseen un alto nivel de acidez, además de que atraen insectos [11]. Las ventajas que trae consigo el uso de subproductos residuales de origen vegetal, se ven reflejadas en los niveles social, industrial y ambiental, al diseñar materiales alternativos cuya producción representa fuentes de trabajo, materiales de bajo costo y cuyas emisiones se ven reducidas al considerar la incorporación de la biomasa a procesos de bajo impacto ambiental.

## 2.2 Objetivos

### General

Desarrollar un biocompuesto para la industria de la construcción a partir de fibras de la sorosis de piña y una matriz polimérica bio-basada.

### Específicos

- ✓ Analizar la superficie de las fibras en estudio mediante tratamiento químico de superficie.

- ✓ Diseñar una configuración estructural para el biocompuesto fibra / polímero y aplicar el método de conformado en placa.
- ✓ Aplicar el Análisis de Ciclo de vida (ACV) para la identificación de los indicadores ecológicos con mayor relevancia en el proceso de obtención del biocompuesto.
- ✓ Determinar las características de resistencia a la tensión, conductividad térmica y biodegradabilidad del biocompuesto, a partir de ensayos ASTM.
- ✓ Realizar una estimación de la vida útil y durabilidad del material en un sistema constructivo

## 2.3 Hipótesis

Si se usan las fibras de la sorosis de piña como material de refuerzo en una matriz biopolimérica, se obtendrá un biocompuesto de bajo costo y bajo impacto ambiental para su aplicación en la industria de la construcción.

## III. LA CÁSCARA DE PIÑA COMO UN SUBPRODUCTO RESIDUAL

### Introducción

La piña (*Ananas comosus*) es uno de los frutos más importantes en el mundo, pertenece a la familia Bromeliaceae, los subproductos de éste fruto están constituidos principalmente por la cáscara, pulpa residual, tallo y hojas. La cáscara es el principal deshecho biológico generado durante el procesamiento de la piña, éste subproducto de la industria agroalimentaria, representa el 29–40% (p / p) del peso total del fruto [12], siendo esta fracción la que ocupa un mayor porcentaje con respecto al fruto. Pruebas

recientes muestran la presencia de importantes compuestos bioactivos en el fruto, tales como los carbohidratos y proteínas, ver **Tabla 2**.

**Tabla 2**

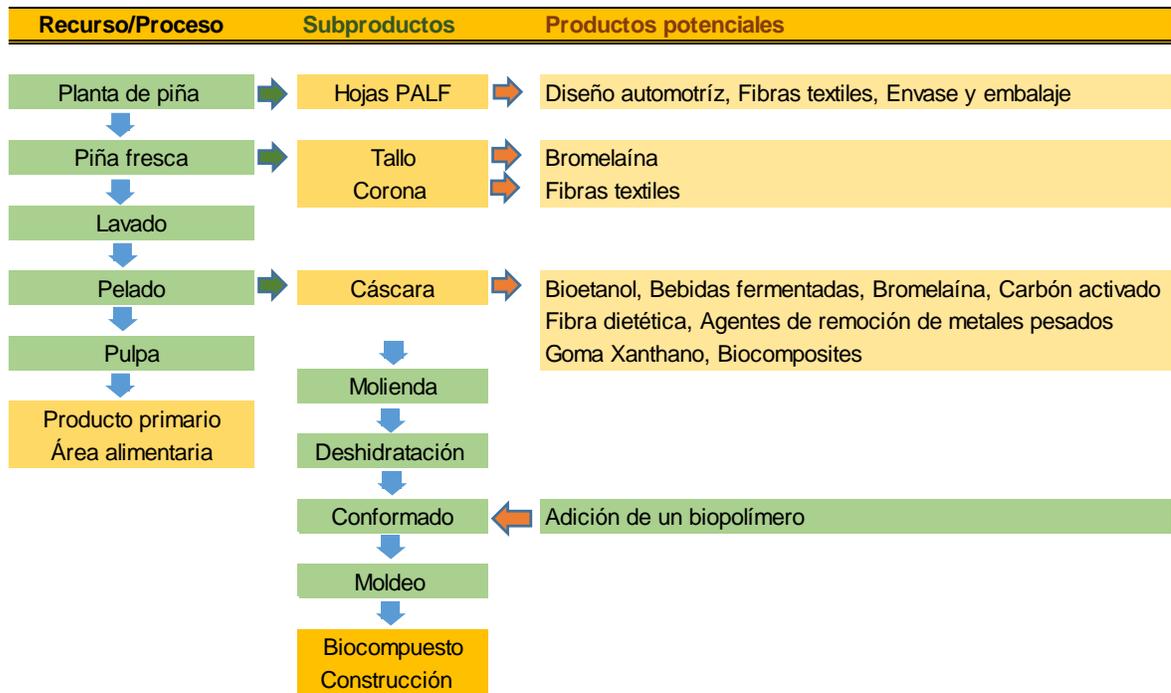
Composición química proximal de la cáscara de piña fresca y seca.

Parámetros	Húmeda	Seca
Humedad (%)	71.07	27.43
Sólidos totales (%)	29.03	72.57
Sólidos volátiles (%)	96.12	95.90
pH	4.70	4.70
Cenizas (%)	3.88	4.10
<i>% en base seca</i>		
Celulosa	11.20	12.00
Hemicelulosa	7.00	6.50
Pectina	6.70	7.10
Sólidos solubles en éter	6.10	6.70
Proteína	3.13	3.30
Azúcares reductores	25.80	27.80
Azúcares no reductores	5.70	4.90
Lignina	11.52	11.00
Ácidos Grasos volátiles (mg/L)	800	6.50

Fuente: (Swaroop Rani & Krishna, 2004) citado en [13].

De la Rocha [14] menciona que los subproductos residuales son considerados como co-productos los cuales pueden ser clasificados como primarios cuyo origen es en las parcelas agrícolas y los secundarios originados en la industria agroalimentaria, siendo la biomasa generada en los cultivos agrícolas el recurso de celulosa más grande del mundo. Los subproductos generados a partir de la industrialización de la piña constituyen hasta el 65 % del fruto, la corona, corazón y las cáscaras generan lo que se considera como rastrojo, el cual corresponde al material vegetal de la planta y se elimina en el ciclo comercial. Se ha establecido que por hectárea de piña cultivada se genera 300 toneladas métricas de rastrojo [15].

En el proceso de transformación de los productos agroindustriales, los subproductos representan fuentes de aprovechamiento con las que se pueden generar otros productos comerciales [16], en el caso de los subproductos de la piña ver **Fig. 3.1**.



**Figura 3.1.** Proceso productivo de la cadena de valor de la piña y sus subproductos  
Fuente: Propia, (2018).

El aprovechamiento de las fibras del rastrojo de piña en materiales compuestos, es una alternativa a las prácticas de eliminación de estos subproductos. Dichos residuos fibrosos son considerados lignocelulósicos por estar formados principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina, esta composición les confiere propiedades y estructura para ser usados en composta, textiles, en la manufactura de pulpa, papel, producción de combustibles alternativos, como la generación de biogás adsorbente entre otros. Por ejemplo, se han hecho estudios donde se ha utilizado la fibra de la corona de la piña como material de refuerzo con cemento portland en proporción 1:3 con el 5 % de fibra mejorando las propiedades mecánicas del material compuesto [16].

A continuación, se muestra en la **Gráfica 2**, los usos de la cáscara de piña y el porcentaje de cada producto:



**Gráfica 2.** Usos de la cáscara de piña  
Fuente: Modificado de Yoong *et al*, (2016).

Este tipo de subproductos presenta ciertas ventajas y limitaciones a considerar, como se muestra en la **Tabla 3**.

**Tabla 3**

Ventajas y limitaciones de los residuos agrícolas

Ventajas	Limitaciones
Son recursos renovables	Los residuos primarios se encuentran esparcidos en el campo, son heterogéneos por lo que su recolección se dificulta
Tienen alta disponibilidad y son complementarios a la producción alimenticia	Los posibles usos compiten entre sí, lo cual afecta la disponibilidad para un uso en particular. Los usos más comunes que presentan:

Presentan bajo o ningún costo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mejoradores del suelo (compost)</li> <li>• Alimentación animal</li> <li>• Usados en mezclas para la construcción</li> <li>• Producción de energía</li> </ul> <p>Estacionalidad (son generados durante la cosecha) y se requiere de tecnología para su procesado y conservación</p>
-------------------------------	---

Fuente: [14].

### 3.1 Análisis macro y microdimensional del subproducto

De acuerdo con [17] “los requerimientos de las construcciones hoy en día tienden hacia una complejidad en la que se requiere del desarrollo de tecnologías para la construcción envolvente, desarrollo de materiales y automatización para garantizar un mejor confort”, en este sentido, se consideran aspectos importantes desde una visión panorámica de escalas ópticas tanto macro como microdimensionales, éstas ayudan a coadyuvar la forma y la función de los materiales. Para tal efecto la traducción de los procesos jerárquicos desempeña un papel importante para conocer el mecanismo de diseño óptimo, es en esta ruta donde se interceptan los campos de la Biotecnología y el Diseño, lo que facilita la transferencia de la morfología natural hacia la Arquitectura, tal que de forma adicional las estructuras vegetales son caracterizadas a partir de sus propiedades físicas y químicas [17].

#### **Enfoque biomimético para un aislamiento térmico ecoeficiente**

La tendencia actual sobre una arquitectura más ecoeficiente y sostenible, ha dado paso al desarrollo de, cambios de configuración con base a la geometría y material para el aprovechamiento de los gradientes de temperatura en materiales de aislamiento térmico. Se han retomado modelos como el de las plantas que han evolucionado de tal manera que su autoorganización<sup>2</sup> ha sido en pro de su adaptación natural, en este sentido, el alto

---

<sup>2</sup> La autoorganización es un proceso a través del cual se adapta la organización interna del sistema al medio ambiente para promover una función específica sin ser controlado desde el exterior.

contenido en fibra ha sido para enfrentar condiciones ambientales adversas, con la capacidad de generar gradientes de tejido, célula o pared celular [18].

Las adaptaciones han evolucionado, sobre todo para hacer eficientes las configuraciones en conjunto con el medio ambiente e integrar la funcionalidad a partir de diversos niveles jerárquicos. Este tipo de jerarquía se ha traducido en la piña *Ananás comosus* a través de cuatro niveles, desde una óptica macrodimensional hasta una óptica microdimensional para el diseño del biocompuesto, ver **Figuras (3.2 y 3.3)**.



**Figura 3.2.** Dimensionamiento (macro y micro) de la cáscara de piña  
Fuente: propia, 2017.



**Figura 3.3.** Composite con fibras de cáscara de piña como carga.  
Fuente: propia

- **Nivel de fruto.** Referido al tamaño y forma, composición y patrones geométricos de la sorosis de la piña, los cuales influyen en la maduración y protección del fruto.
- **Nivel de cáscara molida.** Reducción de partícula a través de molienda (fibra corta). Proporción y organización, formas anisotrópicas y surcos de la partícula triturada.

- **Nivel de tejido.** Contenido de polisacáridos, gomas, celulosa y hemicelulosa, necesarios para la aglomeración.
- **Nivel de configuración en el biocompuesto.** Interacción fibra/matriz, lo que determina las propiedades de adsorción y absorción de agua, propiedades mecánicas y de interacción con el medio.

### 3.2 Valorización de *Ananas comosus* en el sector constructivo

Los valores materiales, en este caso las fibras vegetales, tienen una estructura general de recuperación y mantenimiento, es decir, conservan los valores sustentables de los productos que han finalizado su ciclo de vida (CV). La incorporación del diseño en la economía requiere de una metodología de revalorización de productos, ver **Tabla 4**, inspirada en la comprensión de los seres vivos, la transformación, el enriquecimiento y la simplificación, debe tomar en cuenta las entradas y salidas de materia y energía, en este sentido el diseñador debe tomar las medidas necesarias desde las primeras fases del producto para la prevención de impactos de tipo negativo a nivel ambiental, este tipo de diseño eco eficiente, se centra en la correcta elección de los materiales para lograr objetivos certeros y eficientes, que de alguna manera previenen y presentan una visión panorámica para el desempeño de los objetos de diseño en los diferentes contextos.

**Tabla 4**

Beneficios de la valorización de la cáscara de piña.

Ámbito	Beneficio
Medioambiental	- Puede convertirse en una manera de tratar los residuos vegetales.
	- Mejora la biodegradación del biocompuesto para su integración a la naturaleza.
	- Evita y/o reduce el empleo de recursos no renovables.
Social	- Potencia la producción vegetal ayudando a contrarrestar el efecto invernadero.
	- Genera empleos y nuevas actividades

	- Potencia el sector agrícola y el medio rural
Económico	- Mayor capacidad de adquisición del producto con respecto a materiales emergentes para la construcción.
	- Contribuiría a reducir el uso de polímeros y con ello la reducción de los costos.
	- México ocupa el 9° lugar a nivel mundial en la producción de piña, por lo que se convierte en una importante fuente de ingresos.

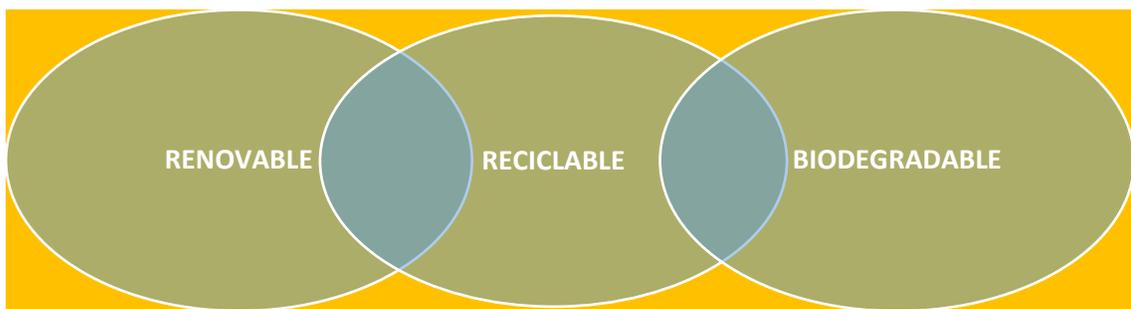
Fuente: Elaboración propia.

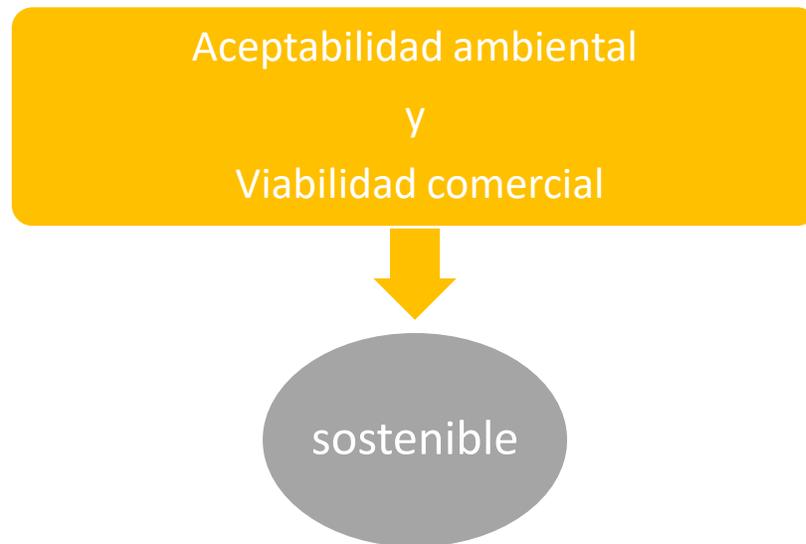
### 3.3 Revisión de la literatura

“Los polímeros naturales se definen como materiales poliméricos sintetizados por la propia naturaleza, por ejemplo, la celulosa, el almidón, las proteínas. En tal caso, los polímeros naturales pueden ser considerados como biopolímeros, pero no todos los biopolímeros son polímeros naturales” [19].

#### 3.3.1 Conceptos de productos sostenibles de origen biológico

Se definen como productos de origen biológico, estables durante su vida de uso, con viabilidad comercial y aceptabilidad ambiental, capaces de ser reciclados, biodegradados después de su eliminación bajo condiciones de composta, **Fig. 3.4**, [20].





**Figura 3.4.** Concepto de “sostenible para productos de origen biológico  
Fuente: (Mohanty et al., 2002, pág. 20).

### ***Compuestos bio-basados***

Lo relacionado a las definiciones de plástico bio-basado<sup>3</sup> y plástico biodegradable puede ser discutido por el tipo de plástico, como se muestra en la **Tabla 5**.

**Tabla 5**

Origen de los plásticos biobasados y biodegradables

Petroquímica	Particularmente bio-basados	Bio-basados
--------------	--------------------------------	-------------

<sup>3</sup> Bio-basado. Definido en las normas europeas EN 16575 como “derivado de la biomasa”. Fuente: (Oever et al., n.d. pág. 15)

No biodegradable	PE, PP, PET, PS, PVC	Bio-PET, PTT	Bio-PE
Bodegradable	PBAT, PBS(A), PCL	Almidón	PLA, PHA, Celofán

Fuente: [21]

Nota: PE= Polietileno, PP=Polipropileno, PET= Polietilentereftalato, PS= Poliestireno, PVC= Cloruro de Polivinilo, PBAT= Poli (Butilen (Adipato-co-Tereftalato), PBS(A)= Poli (Succinato-co- Adipato de butileno, PCL= Policaprolactona, Bio-PET= Bio Polietilen tereftalato, PTT= Poli Trimetileno Tereftalato, Bio Polietileno, PLA= Poli (ácido láctico, PHA= Poli hidroxí alcanoato.

### ***Plásticos biodegradables***

Los plásticos biodegradables<sup>4</sup> son aquellos materiales que pueden ser convertidos por bacterias u hongos en agua, CO<sub>2</sub>, metano y biomasa<sup>5</sup>. La biodegradabilidad está en función de las condiciones ambientales: temperatura, presencia de microorganismos, presencia de oxígeno y agua.

#### 3.3.1.1 Biocompuestos y biopolímeros

Los biocompuestos, o más específicamente los “compuestos verdes” consisten en biofibras y bioplásticos de fuentes renovables. Este tipo de compuestos también mantiene neutral la emisión de CO<sub>2</sub>. Mohanty [20], define biocomposites como “materiales compuestos en los que al menos uno de los constituyentes se deriva a partir de recursos naturales”[20].

<sup>4</sup> Biodegradable. Que se puede descomponer por una actividad biológica, bajo condiciones ambientales específicas causando cambios considerables en la estructura química del material y como resultado la producción de biomasa, dióxido de carbono y agua entre otros. Fuente: Álvarez, C. 2014.

<sup>5</sup> Biomasa. Es un material de origen biológico, excluyendo aquellos de formación geológica y/o fosilizados EN 51675, 2014). Fuente: (Oever et al., n.d. pág. 15)

“La posibilidad de utilizar polímeros reciclados en el diseño de biocomposites, mejora las propiedades del material, la incorporación de refuerzos renovables, puede dar como resultado productos con menor impacto ambiental” [19].

La definición sugerida para biopolímeros comprende unidades materiales que, del todo o en parte, se derivan a partir de la biomasa (materiales de origen biológico), por lo tanto, una lista amplia de materiales puede ser considerada como biopolímeros, tal es el caso del poli (ácido láctico) PLA, en el que la unidad monómera de repetición se deriva de recursos naturales (almidón), a pesar de que el propio producto se obtiene a partir de una síntesis química o enzimática [19].

### 3.3.1.2 Polímeros biodegradables

El uso de polímeros biodegradables como el ácido poliláctico (PLA) da la posibilidad de minimizar los problemas de recolección y almacenamiento de desechos plásticos, problemática grave que se puede apreciar hoy en día en las grandes urbes. Por otro lado, gracias a la nivelación del precio del crudo con estos materiales se han hecho gradualmente más competitivos.

A pesar de sus grandes ventajas los polímeros biodegradables presentan ciertos inconvenientes en cuanto a su resistencia por lo que se ha propuesto su reforzamiento con fibras vegetales que sirven como elementos de carga que mejoran significativamente sus propiedades mecánicas sin que se afecte su reciclabilidad [22].

El ácido poli láctico (PLA, por sus siglas en inglés), es un dímero cíclico preparado por la depolimerización controlada del ácido láctico que, a su vez, se puede obtener por la fermentación del maíz, caña de azúcar y remolacha azucarera [23].

Este biopolímero exhibe propiedades que lo hacen útil para una amplia gama de aplicaciones, incluyendo bolsas y envases; sin embargo, su utilización a gran escala se restringe por sus propiedades relativamente pobres de impacto, no obstante, el uso de fibras naturales para producir compuestos poliméricos ha mejorado las propiedades mecánicas y el impacto en el rendimiento de ellos [24].

El PLA, puede amoldarse a las diferentes tecnologías de procesos como: moldeo por inyección, extrusión de lámina, moldeo por soplado, termoformado, formación de películas e hilado; característica de gran importancia porque no se tiene que conseguir maquinaria diferente para procesarlo, sino que sólo se hacen los ajustes correspondientes a sus propiedades, para poder sustituir a los plásticos convencionales. Se clasifica como un producto GRAS (Generalmente reconocido como seguro) por la *Food and Drug Administration* (FDA) de Estados Unidos (Balckom et al 2002) en [25]. Es totalmente biodegradable, la degradación ocurre con la hidrólisis del ácido láctico, cuando es metabolizado por microorganismos en agua y monóxido de carbono [26].

#### 3.3.1.3 Los polisacáridos

Son biopolímeros naturales de actual interés por su alto potencial para sustituir el agotamiento de polímeros derivados del petróleo. El agua se une a los grupos polares de polisacáridos, que típicamente producen una red tridimensional transitoria de enlace de hidrógeno en la que los enlaces se rompen y reforman constantemente.

Existen algunos polímeros biodegradables comerciales, como la poli caprolactona (PCL), poli (ácido láctico) (PLA), poli hidroxí alcanoatos (PHA), poli etilen glicol (PE) y poli butilen succinato- co- butilen adipato (PBSA). Aunque los costos de estos polímeros, totalmente biodegradables derivados de fuentes renovables, son comparativamente más altos que los no degradables.

#### 3.3.1.4 Almidón termoplástico

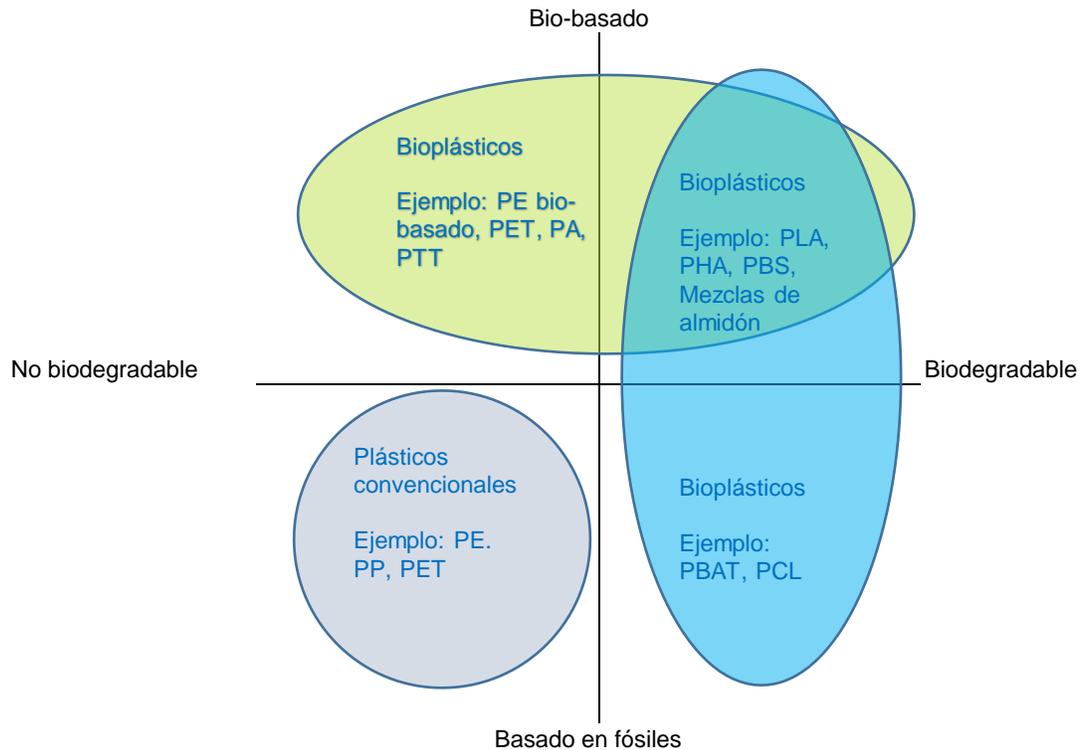
Los almidones son aplicables a procesos termoplásticos, a diferencia de otros polisacáridos como la celulosa u otras gomas. El almidón termoplástico es un polímero que almacena energía a través de sus enlaces lo que hace posible que las enzimas lo biodegraden después de su vida útil. Éste tiene una microestructura única que contribuye a los cambios multifase durante su procesamiento térmico, ocurren múltiples reacciones físicas y químicas durante su transformación, por ejemplo: la difusión de agua, la

expansión granular, gelatinización, descomposición, fusión y cristalización. De los cambios de fase, la gelatinización es la más importante porque ésta significa la conversión de almidón a termoplástico. Su temperatura de descomposición es más alta que su temperatura de fusión. Las técnicas convencionales de procesamiento son: extrusión, moldeo por inyección, moldeo por compresión, termoformado y extrusión reactiva.

El almidón es un biopolímero versátil, obtenido de fuentes vegetales renovables como el maíz, la papa, el trigo, el cual consiste en dos componentes principales: amilosa y amilopectina. Es económicamente competitivo con los polímeros derivados del petróleo, su principal plastificante es agua, pero pueden ser utilizados: glicerol, azúcares alcoholes, polioles, surfactantes aniónicos y no iónicos, almidón+ nanoarcilla Cloisid 30 B+ PLA. Los rellenos minerales típicos incluyen: talco, arcillas sílice y fibras de celulosa, particularmente celulosa microcristalina, y nanofibras de celulosa, el proceso a seguir es el de extrusión con múltiples entradas para los diferentes componentes.

El almidón es una fuente de nutrientes para microorganismos lo cual lo hace susceptible para el crecimiento de hongos y bacterias. La degradación térmica de un almidón aparece por la pérdida de agua [27].

En la **Gráfica 3**, se muestra por cuadrantes la clasificación de los polímeros biobasados - biodegradables y no biodegradables y, por otro lado, los polímeros basados en fósiles – biodegradables y no biodegradables. Así mismo, se observa la conjunción de los polímeros biobasados con los polímeros biodegradables quedando en el primer cuadrante, ejemplo: PLA, PHA, PBS y mezclas de almidón.



**Gráfico 3.** Sistema de coordenadas de materiales bioplásticos

Fuente: Modificado de European Bioplastics [28].

### 3.3.1.5 Biopolímeros eco-eficientes para la construcción

Hoy en día, existe tendencia por el uso de productos naturales o biodegradables en los materiales de construcción, como ejemplo, se tienen los aditivos biológicos que compiten con mezclas de polímeros sintéticos y a veces, son indispensables en la formulación de algunos productos como los morteros de concreto, revocos de pared o adhesivos de baldosas.

Según McCanann y Carpita [29] algunos bioproductos usados en el concreto son lignosulfonato, gluconato de sodio, extracto de raíz de pino, hidrolizados de proteína y goma gellan; y en mortero de mezcla seca, metilhidroxipropilcelulosa, hidroxipropil almidón, goma guar, ácido tartárico, caseína, succinoglicano y goma de xantano [29]. Estudios previos han mostrado que las propiedades mecánicas como la resistencia a la compresión de bloques de tierra mezclados con biopolímero (por ejemplo xantano 1%

con 1% de gellan<sup>6</sup>), cumplen con los criterios internacionales como agentes ligantes y tienen alto poder de ensamblado en construcciones locales donde el uso de cemento ordinario se encuentra restringido [30].

Un estudio reciente demostró que la goma de xantano mejora la resistencia del suelo de manera significativa, en especial con la presencia de partículas arcillosas (es decir, debido al enlace de hidrógeno entre la goma de xantano y las partículas de arcilla) [30].

### 3.4 Diseño del biocompuesto

De acuerdo con [31] los requisitos de diseño para el desarrollo de un híbrido son los siguientes:

- ✓ Formular y priorizar requisitos de diseño y criterios de excelencia
- ✓ Identificar los requisitos en conflicto
- ✓ Buscar soluciones separadas para material y forma
- ✓ Explorar la compatibilidad y reconstruir posibles soluciones
- ✓ Clasificar soluciones utilizando criterios de excelencia

Para el desarrollo del biocompuesto se llevó a cabo una serie de formulaciones priorizando siempre características resaltantes de excelencia como el bajo peso, conductividad térmica, textura y compatibilidad del material celulósico con los biopolímeros. En cuanto a la identificación de los conflictos se trabajó en las características higroscópicas del composite haciéndolo menos permeable a la humedad al utilizar PLA como una segunda matriz biopolimérica. En ésta búsqueda de soluciones se trabajó en un diseño óptimo para su aplicación como aislante térmico en interiores, ver

### **Fig. 3.5.**

---

<sup>6</sup> La goma gellan es un polisacárido soluble en agua fermentado a partir de *Sphingomonas elodea* y está compuesto por glucosa, ácido glucurónico y ramnosa. La goma gellan se usa comúnmente como espesante, emulsionante y estabilizador para productos alimenticios y debido a su alta estabilidad a altas temperaturas y bajo pH se usa para la mejora y estabilización de suelos. Fuente: [30].

Tipo de conformación	Descripción
	<p>En cuanto al diseño, se designó una conformación en placa la cual contiene solo fibra y matriz biopolimérica, la cual corresponde a una solución de baja resistencia estructural y poco permeable al agua.</p>
	<p>La segunda variante corresponde a la formulación de fibra, arcilla y biopolímero, baja permeabilidad al agua.</p>
	<p>Como tercera opción se le configuró un panel tipo <i>sándwich</i> utilizando PLA en las capas superior e inferior, una variante de este fue utilizando la misma masa del biocompuesto en las capas mencionadas y en el centro un núcleo de fibra celulósica (cáscara de piña), alta permeabilidad al agua.</p>

**Figura 3.5.** Conformado de los laminados con cáscara de piña triturada  
Fuente: propia, (2019).

Los materiales monolíticos ofrecen una amplia gama de propiedades, pero en diseño existen requerimientos especiales que no podrían ser tratados con un solo material, en este sentido, se trata de desglosar los requerimientos solicitados por separado, a partir de la búsqueda de materiales y posteriormente combinarlos sin que pierdan sus atributos deseables. La elección óptima será la que cumpla con las métricas establecidas en el diseño como: la minimización de la masa, el costo o la maximización de algún rendimiento, para finalmente poder ser evaluados y validados según los criterios de excelencia, el resultado es un composite híbrido en función de sus componentes y geometría.

Como menciona [32] el *composite* fibroso, puede estar conformado por diversas formas:

- a) De forma unidireccional
- b) De manera aleatoria (fibras cortas)
- c) Con disposición ortogonal (mallas ortogonales)
- d) En varias capas alternadas

En el composite de piña se utilizó material celulósico particulado. La estructura, composición química, ángulo microfibrilar y los defectos en las dimensiones celulares son las variables más importantes que afectan las propiedades de las fibras. Una fibra es más dúctil si la orientación de las microfibrillas es en espiral a lo largo del eje, si las microfibrillas tienen orientación paralela al eje entonces serán rígidas e inflexibles.

En la **Tabla 6**, se muestra una clasificación de los composites en donde se relaciona tipo, tamaño de partícula y densidad, propiedades que determinan el tipo de producto.

**Tabla 6**

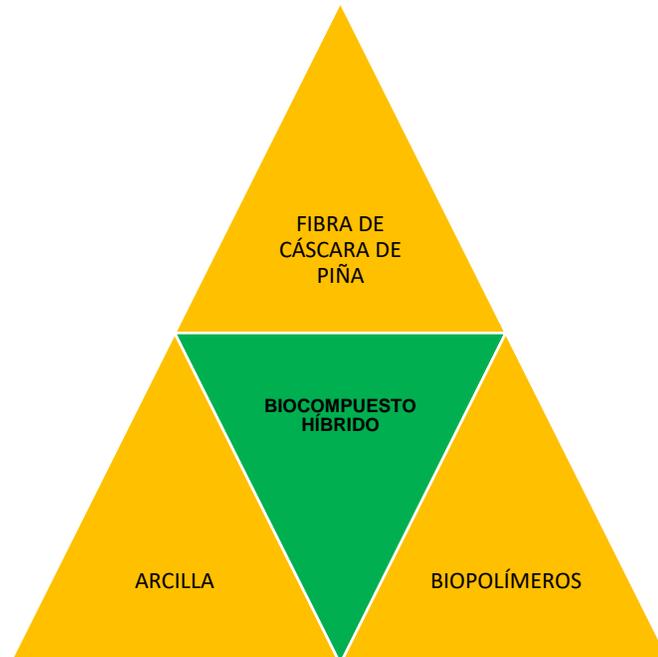
Clasificación de los composites basados en materia prima, tamaño de partículas y densidad

Materia prima	Densidad g/cm <sup>3</sup>	Sólido	Chapa y madera	Partícula	Fibra y relleno	Nano
Madera	0.4 - 0.8	√				
Madera contrachapada	0.4 – 0.8		√			
Madera contrachapada laminada (LVL)	0.4 – 0.9		√			
Tablero de junta	0.4 – 0.78			√		
Tableros de fibra orientada	0.5 – 0.88			√		
Tablero de lino	0.54 - 0.9			√		
Tablero de partículas	0.56 – 0.9			√		
Tableros duros	0.9 – 1.1				√	
Compuesto termoestable (relleno reforzado)	1.1 – 1.44				√	
Compuesto termoplástico (relleno reforzado)	1.1 – 1.34				√	
Nano biocompuesto	1.1 – 1.5					√

Fuente: Modificado de Mustapha [33].

Los materiales híbridos combinan las propiedades de dos (o más) materiales monolíticos, o de un material y espacio, Incluyen materiales compuestos fibrosos y particulados, como los obtenidos a partir de la cáscara de piña.

Las propiedades del híbrido reflejan las de sus materiales componentes, combinadas en una de varias maneras posibles. Los paneles *sándwich* ilustran la dualidad, a veces vista como dos hojas de material de cara separadas por un material de núcleo, y algunas veces, para permitir la comparación con materiales a granel, como un "material" con su propia densidad, rigidez y resistencia. Llamar a cualquiera de estos un "material" y caracterizarlo como tal es una forma abreviada útil, que permite a los diseñadores utilizar los métodos existentes cuando diseñan con ellos. Pero si se diseña el híbrido, se debe deconstruir, y pensarlo como una combinación de materiales (o de material y espacio) en una geometría definida [31].



**Figura 3.6.** Composite híbrido de cáscara de piña  
Fuente: propia, 2019.

De acuerdo con [31], al combinar 2 o más componentes se llega a un biocompuesto híbrido. El biocompuesto en estudio, está conformado por biopolímeros, fibra de cáscara de piña y arcilla.

Ashby y Bréchet definen:

***Forma: estructura, sándwich y montajes segmentados***

La forma y configuración de los componentes A, B y C de un híbrido juegan un papel clave en la determinación de sus propiedades. La forma se puede utilizar para mejorar o disminuir la rigidez y la resistencia, para impartir tolerancia a los daños y manipular el límite de percolación. El núcleo ocupa la mayor parte del volumen, debe ser ligero y rígido para que soporte las tensiones de corte como una unidad de carga.

***Eficiencia y factores de la forma***

Realización de estructuras de baja eficiencia, la forma confiere a las secciones una menor rigidez, a la flexión y resistencia por unidad de masa que la sección sólida a partir de la cual están hechas. La baja eficiencia de la forma se logra formando el material en hebras u hojas.

***Forma a microescala***

La eficiencia estructural puede ser manipulada a través de la forma a pequeña escala, forma microscópica o micro estructural, por ejemplo, el componente sólido del composite (celulosa, polisacáridos, arcilla y otros polímeros) se moldean en laminados manteniendo el componente sólido en dispersión aumentando la rigidez a la flexión y la fuerza necesaria para la compactación.

***Disposición en stacks o sandwich***

La combinación de materiales establecida en una cara y la conformación de un núcleo regularmente más ligero para dar estructura y rigidez, la separación de las caras asigna un momento de inercia aumentado y dando como resultado una estructura eficiente, en cuanto a resistencia de cargas, flexión y pandeo.

En la actualidad, la industria de la construcción representa el sector con más emisiones de CO<sub>2</sub> al medio, con mayores demandas y costos energéticos, por lo que se requiere de diseños adaptativos para superar esta perspectiva desalentadora y permita entrar a una era de innovación, en este sentido, se tiene la tendencia hacia los materiales inteligentes que tienen la capacidad de adaptarse, regular y controlar algunos de los factores del sistema constructivo.

La envolvente del sistema constructivo, puede considerarse de manera literal como una membrana capaz de intercambiar energía, material e información. Puede diseñarse para operar a partir de un metabolismo y morfología de construcción integral y a menudo conectada con otras partes a partir de sensores e interfaces, Wigginton y J. Harris, citado en [34].

Se definen las características de los materiales inteligentes como: "inmediatez" (respuesta en tiempo real), "transitoriedad" (sensible a más de un estado del medio ambiente), "auto-realización" (inteligencia interna), "selectividad" (una respuesta es discreta y predecible) y "directo" Addington y Schodek [35]. Una de las características más importantes de los materiales inteligentes es que tienen la capacidad de transformar sus propiedades y / o forma física, o para intercambiar energía sin necesidad de una fuente externa de energía.

Existen los geles termorreversibles que se pueden formar tras cambios de temperatura sin necesidad de catalizadores, en este caso los biopolímeros (polisacáridos), una vez disueltos en agua cambian su estructura desde un estado líquido a una sustancia sólida (gel) al disminuir la temperatura por debajo de su punto crítico en el que se produce un aumento claro de su viscosidad, la cual se denomina temperatura de gelificación, ( $T_g$ ), éste cambio de estructura se explica mediante la formación de puentes de hidrógeno entre las cadenas del polisacárido y el agua. Existen dos tipos de gelificantes térmicos, los que gelifican al enfriar (carragenatos, gomas, gelatina, agaroides) y los que gelifican al calentar (metilcelulosas, proteínas, etcétera).

### 3.4.1 Factores que influyen en el procesamiento de las fibras vegetales

La naturaleza hidrofílica de las fibras es uno de los factores que afectan, la relación fibra-resina, en los biocompuestos. Debido a ello se han hecho investigaciones para el tratamiento de la superficie de la fibra. Las propiedades mecánicas del biocompuesto dependen del tipo de fibra usada y su homogenización en la matriz polimérica. Las claves para controlar los factores que afectan a estas propiedades son el contenido de celulosa en la fibra, la orientación, longitud y diámetro de la fibra [36].

En las **Tablas 7 y 8**, se muestran los criterios tomados en cuenta para la selección de productos con base a su aplicabilidad, en el caso específico del biocompuesto de cáscara de piña se direccionó hacia la industria de la construcción, por lo que los criterios elegidos contrastan las propiedades que mejor se adecuan a las propiedades del biocompuesto, por ejemplo, su baja densidad, sus propiedades de aislamiento térmico y acústico, sus propiedades mecánicas, etcétera.

**Tabla 7**

Criterios que afectan la selección de productos hechos de fibras naturales en materiales compuestos.

Categoría	Propiedad/característica	Criterios
Características del composite	Físicas	Densidad total, topología superficial, textura, superficie, rugosidad, coeficiente de dilatación térmica, calor específico, conductividad eléctrica, color y estética, índice de reflexión, opacidad translucidez.
	Químicas y biológicas	Biodegradabilidad, estabilidad biológica, toxicidad, almacenamiento (anaquel), reciclabilidad, ciclo de vida, absorción de agua, resistencia a la intemperie, resistente a la luz solar y UV, posibilidad de reciclaje térmico.
	Mecánicas/estructurales	Módulo elástico, módulo de corte flexural, módulo, elasticidad, resistencia a la compresión, relación de

	Técnicas	<p>Poisson, tenacidad a la fractura, resistencia a la fatiga, resistencia a la fluencia, dureza, alargamiento a la rotura, resistencia al impacto, dureza</p> <p>Conocimiento y tiempo de fabricación, costo de fabricación, reproducibilidad, calidad del producto, esterilizabilidad, envasado, parámetros de proceso. (presión, temperatura, tiempo de curado, y superficie requisitos de acabado), estabilidad térmica, Procesabilidad secundaria, nivel de automatización, Protección laboral y seguridad, coste del ciclo de vida, costo de mejora de rendimiento, posibilidad de producción homogénea / no homogénea composites.</p>
--	----------	---

Fuente: Modificada de (AL-Oqla, et al., 2014) en (Hakeem, Jawaid, & Rashid, 2014).

**Tabla 8**

Criterios tomados en cuenta para el composite de cáscara de piña.

Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Categoría	Propiedad/Característica	Criterios
Desempeño del composite	Requisitos específicos basados en la aplicación deseada (aquí, Industria de la construcción).	Peso total, propiedades de aislamiento térmico y acústico, facilidad de mantenimiento, resistencia a la humedad, resistencia mecánica, resistencia a los agentes microbianos.

Fuente: basada en: ( Al-Oqla y Sapuan, et al., 2014) en (Hakeem et al., 2014).

#### 3.4.1.1 Humedad

Este factor interfiere en la interacción de la fibra con la matriz biopolimérica, puede tener efectos adversos como la formación de burbujas en el biocompuesto, por lo que es importante un secado previo de las fibras naturales antes de ser procesadas con el polímero [38].

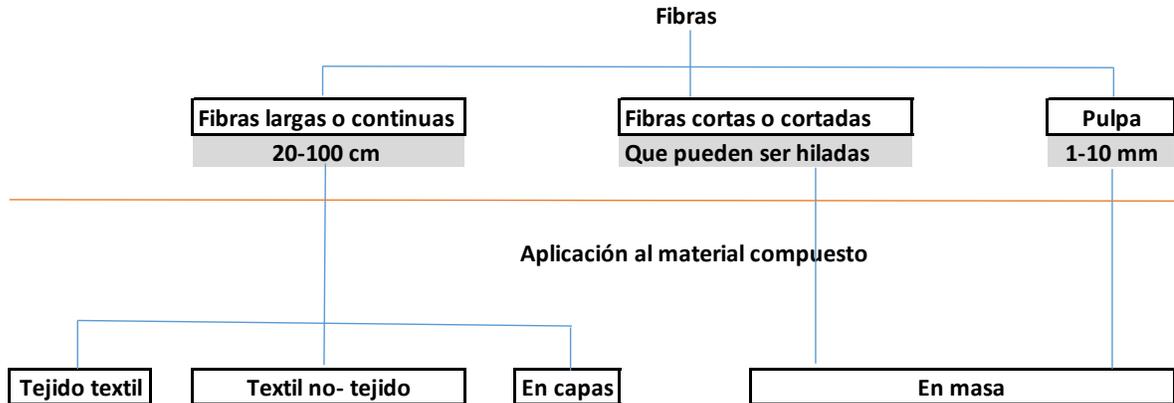
#### 3.4.1.2 Contenido y tipo de fibra

El tipo de fibra natural y el contenido son generalmente esenciales para promover la sostenibilidad del biocompuesto, es decir, la correcta elección de los materiales de construcción puede contribuir en la reducción del consumo de energía, por lo que se debe priorizar y promover los materiales locales, la longitud de la fibra y la relación de aspecto forma: corta o larga, longitud/diámetro y la composición química [38].

En general, un aumento en el contenido de fibras en el material compuesto, aumenta la rigidez de manera significativa, adicionalmente se incrementa su fuerza de resistencia. Por otra parte, se puede afectar la ductilidad del material, finalmente la longitud de la fibra y su geometría juegan un papel decisivo [38].

#### *Refuerzo con fibras vegetales*

El principio básico de reforzar, es transmitir esfuerzos a las fibras, de manera que sirvan de sostén y distribuyan mejor las cargas de tensión del compuesto a través de su anclaje con la matriz, logrando una especial mejora en el comportamiento post-agrietamiento. Esto se traduce en una mayor resistencia a flexión, mejorando el Módulo de Rotura (MOR). En la **Fig. 3.7** se puede observar la clasificación de las fibras en función de su forma



**Figura 3.7.** Clasificación de fibras según su forma  
Fuente: Llerena [39].

Por otro lado, el uso de aditivos apropiados (agentes de acoplamiento, lubricantes, estabilizadores de la luz, colorantes, retardantes de la flama, agentes espumantes, reductores de olor y biocidas en muy pequeñas cantidades (0.5-5%), pueden mejorar significativamente las propiedades fisicoquímicas o mecánicas del biocompuesto [38].

### 3.5.1.3 Superficie de la fibra vegetal

Hoy en día existen infinidad de tratamientos de superficie de las fibras vegetales, con el motivo de facilitar la unión en la interfase fibra- matriz. Para el caso específico de la cáscara de piña, no se requirió un pretratamiento extra, para mejorar la superficie de la fibra, dado que, durante la fase microscópica se observó que la superficie de las partículas de cáscara de piña ya tenía una textura en forma de surcos acanalados, no obstante, se llevó a cabo un pretratamiento con hidróxido de calcio para mejorar el aroma del biocompuesto en la fase de experimentación.

### 3.4.1.4 Tecnologías de procesamiento para termoplásticos reforzados con fibra vegetal.

Existen diversas tecnologías para el procesamiento de los polímeros reforzados con fibras naturales, a continuación, se presenta en la **Tabla 9**, una revisión de diferentes técnicas según el tipo de compuesto, propósito y referentes.

**Tabla 9**

Técnicas de procesamiento para compuestos poliméricos.

No.	Técnica	Tipo de compuesto de polímero procesado / fabricado	Referencia
1	Manual	Materiales epoxi de fibra de yute bidireccional	Mishra V, and S. Biswas, (2013)
		Compuestos de poliéster reforzado con fibras de yute, sisal y fibra de vidrio	Ramesh M, Palanikumar K, and K.H. Reddy, (2013)
		Compuesto epoxi- híbrido reforzado con fibra de vidrio- sisal- yute	Ramesh M, Palanikumar K, and K.H. Reddy, (2013)
		Compuestos poliméricos reforzados con fibra de plátano	Ramesh M, Atreya TS, Aswin US, Eashwar H, and C. Deepa, (2014)
		Compuestos de poliéster reforzados con fibra de fruta ( <i>Calotropis gigantea</i> )	Babu GD, Babu KS, and P.N. Kishore, (2014)
		Compuestos de fibra de sisal y yute	Costa FH, and J.R. d'Almeida, (1999)
2	Aspersión	Compuestos verdes basados en PLA	Bajpai P. K., Singh I., and J. Madaan, (2012)
		Compuestos epoxi- reforzados con corteza de coco	Kumar S.S., Duraibabu D., and K. Subramanian, (2014)
		Nano dióxido de silicio y diferentes estructuras de lino	Ashworth S, Rongong J, Wilson P, and J. Meredith, (2016), S. Siengchin and R. Dangtungee. (2014)
		Desarrollo de una caja de papel Kraft revestida con materiales aislantes térmicos utilizando desechos naturales	Klinklow N, Padungkul S, Kanthong S, Patcharaphun S, and R. Techapiesancharoenkij, (2013)
3	Moldeo por compresión	Compuestos de polietileno reforzados con fibra natural corta y caucho natural	Abdelmouleh M, Boufi S, Belgacem MN, and A. Dufresne, (2007)
		Compuestos reforzados con fibra de yute, con matrices de poliéster y resina epoxi	Gopinath A, Kumar MS, and A. Elayaperumal, (2014)
		Compuestos híbridos reforzados con plátano / sisal	Ramesh M, Palanikumar K, and K.H. Reddy, (2013)

		<p>Fibras naturales como refuerzo en compuestos de ácido poliláctico (PLA) Compuestos de polipropileno reforzado con fibras de bagazo de caña de azúcar</p> <p>Acetobutirato de celulosa (CAB) y caucho natural (NR) reforzados con matrices de polímeros renovables.</p> <p>Compuestos reforzados con hilo de fibra de ramio Hilos de yute-Biopol compuestos</p> <p>Un dispositivo de hidrogel / HAPEXTM a base de PHEMA reforzado con fibra de múltiples componentes para prótesis de disco intervertebral personalizadas Refuerzos a base de fibra natural en compuestos epoxi procesados por bobinado de filamentos Fibras de sisal tejidas y resina epoxi modificada con caucho natural</p>	<p>Oksman K, Skrifvars M, and J.F. Seli, (2003) Luz SM, Gonçalves AR, and A.P. Del'Arco, (2007) Ly B, Thielemans W, Dufresne A, Chaussy D, and M.N. Belgacem, (2008) Ma H, Li Y, Shen Y, Xie L, and D. Wang, (2016) Mohanty AK, Khan MA, Sahoo S, and G. Hinrichsen, (2000) Gloria A, De Santis R, Ambrosio L, Causa F, and KE.Tanner, (2010) Lehtiniemi P, Dufva K, Berg T, Skrifvars M, and P. Järvelä, (2011) Srisuwan S, Prasoetsopha N, Suppakarn N, and P. Chumsamrong, (2014), Hossain MR, Islam MA, Van Vuurea A, and I. Verpoest, (2013) Thwe MM, and K. Liao, (2002) Ruksakulpiwat Y, Suppakarn N, Sutapun W, and W. Thomthong, (2007) Luz SM, Gonçalves AR, and A.P. Del'Arco, (2007) Biswas S, Shahinur S, Hasan M, and Q. Ahsan, (2015), Goulart SA, Oliveira TA, Teixeira A, Mileo PC, and D.R. Mulinari, (2011)</p>
4	Devanado de filamentos		
5	Bobinado de inyección	<p>Compuestos híbridos de matriz de polímero reforzado con fibra de vidrio y bambú Compuestos vetiver-polipropileno</p> <p>Compuestos de polipropileno reforzado con fibras de bagazo de caña de azúcar</p> <p>Compuestos de fibras de palma reforzados con polipropileno</p>	

Fuente: Modificado de [40].

El PLA puede ser procesado adaptando ciertas modificaciones en las máquinas convencionales para el procesamiento de termoplásticos, las principales técnicas empleadas son:

- ✓ Termoformado
- ✓ Moldeo por compresión y termo compresión
- ✓ Inyección
- ✓ Soplado
- ✓ Extrusión de film
- ✓ Extrusión de fibra por “*melt spinning*” hilado en estado fundido, para aplicaciones de tejidos

### ***Moldeo por compresión***

Es un método muy utilizado para la fabricación de materiales compuestos de fibra natural y resinas termoestables, debido a su alta reproducibilidad en cortos tiempos, consiste en el moldeo de materiales en placa en moldes emparejados; la principal ventaja es la reproducción de piezas de geometría compleja en un tiempo muy corto. El proceso completo de moldeo incluye desde la preparación de los moldes, y la colocación del material compuesto dentro de los mismos, posteriormente se aplica una presión, que hace que los componentes adquieran la forma de los moldes, además funciona para altos volúmenes de producción, es considerado un método primario de manufactura para producción de algunos componentes automotrices.

El procedimiento por compresión es similar al prensado manual, la presión antes de que tome lugar el curado permite menos emisiones de compuestos orgánicos volátiles (VOC), además, al aplicar este método, se podría alcanzar hasta el 70% en peso de la carga de fibra y un espesor del producto de 1–10 milímetros. La presión aplicada comprime los huecos intrafibras de manera más efectiva, la cual suele ser de 7–14 MPa, aunque algunos termoestables pueden requerir presiones de hasta 345 kPa o incluso solo contacto simple [41].

### ***Moldeo por termo compresión***

La compresión termofija, es un proceso que utiliza placas de fibra rociadas con resina y comprimidas finalmente con placas metálicas calientes y, por medio de un proceso de vacío, la placa toma la forma del molde inferior, ver **Tabla 10**.

**Tabla 10**

Fibras usadas para biocompuestos con PLA, por los métodos de compresión e inyección.

PROCESOS DE MANUFACTURA	TIPO DE FIBRA
Moldeo por compresión	Fibras naturales
	Ramio
	Jute
	Kenaf
	Cáñamo
	Lino
	Bambú
	Henequén
	Pulpa de remolacha
	Fibras de Celulosa hechas por el hombre
Moldeo por inyección	Lyocell
	Kenaf
	Cáñamo
	Bambú
	Fibra de madera
	Fibra de pino
	Seda
	Pulpa de madera
	Pulpa de remolacha
	Fibras de Celulosa hechas por el hombre
Cordenka	
Viscosa	
Lyocell	
Otros: Celulosa microcristalina, reciclada	

Fuente: [42].

### 3.4.1.5 Factores de calidad en ambientes interiores

En el NAMA de Vivienda (Acciones de Mitigación Nacionalmente Apropriadas, por sus siglas en inglés) se menciona que, el sector vivienda es el causante del 17% del consumo total de energía en México [43]. El programa consideró la eficiencia energética con base en el “Desempeño Integral de la Vivienda” desde una perspectiva sustentable a partir de la transferencia de tecnologías y desarrollo local de materiales y ecotecnologías amigables con el medio ambiente.

## IV. PROCESO METODOLÓGICO Y DE DISEÑO

### Introducción

Este proyecto se fundamenta en la herramienta metodológica propuesta por Contreras, et al [44] conocida como Diseño Ambientalmente Integrado (dAI) en complemento con la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV), Metodología del Instituto de Ciencias Medio ambientales de la Universidad de Leiden (CML), un proceso cuantitativo y comparativo experimental entre el comportamiento de la cáscara de piña pretratada y biopolímeros como: almidón, polisacáridos y arcillas, como se expone en la **Tabla 11**.

**Tabla 11**

Metodologías y herramientas consideradas en el proyecto

Metodología	Aplicaciones	Autor/código
- <b>Herramienta metodológica dAI</b> <b>(Diseño ambientalmente integrado)</b>	Comprende las fases a seguir a lo largo del Proyecto	Contreras <i>et al</i> , 2009
- <b>Análisis Macro y microdimensional</b>	Determinación de los niveles jerárquicos y estudio de la autorganización vegetal de la srosis de piña	Knippers, 2012, Universidad del Cairo Egipto. Mingallon y Ramaswamy, 2012, Canadá e India.
- <b>Diseño del biocompuesto y del panel</b>	Pasos a seguir para definir requisitos y criterios de excelencia en el Diseño de un biocompuesto híbrido	Ashby y Bréchet, 2003
- <b>Biomimética</b>		
<b>Marco Normativo</b>	Flexión	ASTM D790

	Tensión	ASTM D638
	Determinación de absorción de agua	ASTM D570-98
	Determinación de conductividad térmica	
<b>Análisis de ciclo de vida (Metodología (CML))</b>	Definición y Análisis de los factores de impacto ambiental durante el ciclo de vida del Biocompuesto	Instituto de Ciencias Medioambientales de la Universidad de Leiden en los países bajos
<b>Ecodiseño</b>		
<b>EPD (Environmental Product Declaration) con base a la Normativa ISO 14025:2013</b>		Equipo de Investigación de la Dra. Adriana Del Borghi, a través de Arellano (2019) con apego a la Norma ISO 14040, Departamento de Ingeniería Civil Química y Ambiental (DICCA ) de la Escuela Politécnica de la Universidad de Génova Italia

Fuente: propia, 2019.

#### 1). Fase de planificación y diagnóstico

Esta fase consiste en el estudio del estado de la técnica en materia de biocompuestos elaborados a partir de cáscara de piña (*Ananas comosus* L. Merr) y biopolímeros con la finalidad de desarrollar un panel usado en un sistema constructivo de vivienda en interiores.

#### 2). Fase de generación de alternativas para el diseño del panel constructivo

En esta fase se define la configuración estructural de la cáscara de piña pretratada (molida y seca) en el panel como material disperso y discontinuo en una matriz biopolimérica.

3). Fase de elección de alternativas, mediante Análisis de Ciclo de Vida (ACV) y requerimientos de diseño del panel.

4). Fase de desarrollo técnico del panel final

5). Fase de elaboración de ensayos y pruebas mecánicas del panel

6). Fase de desarrollo estadístico

- Recopilación de información bibliográfica y elaboración de una base de datos sobre biocompuestos a partir de fibras de cáscara de piña, métodos de laminado, deshidratación y tratamiento de la superficie de las fibras.
- El método a seguir para este proceso es el de moldeado por compresión, La aplicación de temperatura y presión estará dada por el punto de fusión del polímero, y la resistencia de las fibras de la sorosis de la piña. Previo al tratamiento de termo conformado, se le dará un tratamiento de deshidratación a la fibra para eliminar el contenido de agua.
- Análisis de Ciclo de vida (ACV).

## 4.1 Diseño Experimental

### 4.1.1 Materiales y métodos

Los residuos lignocelulósicos elegidos (cáscara de piña), provenientes de la especie piña miel género *Ananas comosus*, con un peso húmedo de alrededor de 450 g de cáscara por pieza de piña.

#### ***Características del material***

Cáscara de piña: Se utilizó piña (*Ananas comosus*), origen Veracruz, México, en estado maduro para la obtención de la cáscara. La transformación de la cáscara de piña se llevó a cabo para dos procesos: 1) Se cortó la cáscara de piña en segmentos de 3 cmx1 cm, 2) El segundo tratamiento consistió en la molienda de la cáscara de piña.

### 4.1.2 Pretratamientos de la cáscara de piña

La importancia de los pretratamientos de la cáscara de piña radica en la mejora de sus propiedades a través de diferentes procesos químicos, mecánicos, etcétera, específicamente en la forma y superficie de la fibra obtenida, con el objeto de mejorar la interfase fibra- matriz.

Preparación de las muestras: Se procedió a lavar la piña y pesarla completa. También se pesó la corona y la cáscara por separado. Una vez registrado el peso se

procedió a cortar la cáscara a partir de sus segmentos hexagonales los cuales miden 2.5 centímetros aproximadamente. Seguido de un proceso de molienda con agua, se escurrió el exceso y se comprimió.

#### 4.1.2.1 Lavado

Después de seleccionar la cáscara de piña se pone en contacto con agua y una solución diluida de hipoclorito de sodio al 5 % para así quitar los contaminantes y demás impurezas superficiales del subproducto, esta etapa se lleva a cabo en un tanque con el objetivo de eliminar la contaminación por microorganismos y eliminar la tierra adherida a la cáscara.

#### 4.1.2.2 Molienda

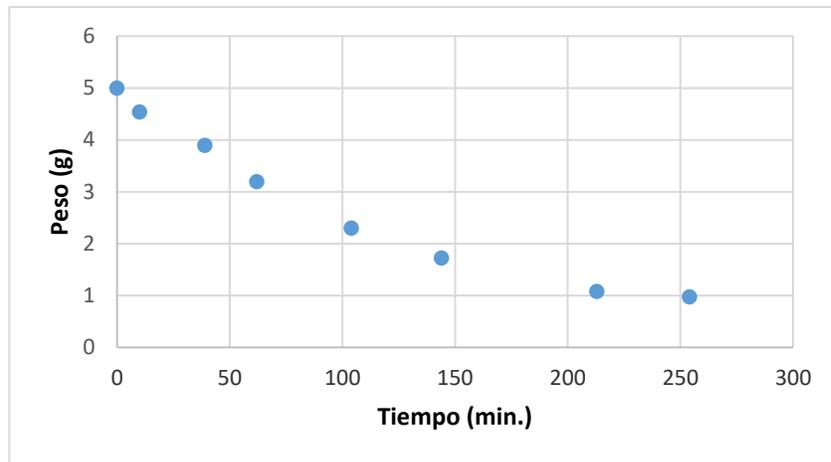
El proceso de molienda se usa principalmente para obtener un tamaño de partícula reducido y homogéneo, particularmente para crear superficies de alta calidad y precisión, sin embargo, durante el proceso se pueden detectar daños por delaminación y microfisuras, que afectan el rendimiento de los materiales compuestos. Para el proceso de reducción de tamaño de la fibra de cáscara de piña se usó un cortador de cuchillas de tipo rotatorio a intervalos de 1-2 minutos a una velocidad moderada.

#### 4.1.2.3 Deshidratación

El principal objetivo de este pretratamiento es la liberación de la capacidad de absorción, es decir, al eliminar el contenido de humedad de la fibra, quedando disponibles espacios para la matriz biopolimérica, esto mejora el proceso de integración del biocompuesto.

##### 4.1.2.3.1 Deshidratación solar

El secado por placas el más común, la exposición de la cáscara durante cuatro horas una vez molida, ver **Gráfica 4**.



**Gráfica 4.** Pérdida de peso de la cáscara de piña con respecto al tiempo

Fuente: elaboración propia

#### 4.1.2.3.2 Deshidratación por convección natural

Se lleva a cabo de la misma forma que en el secado solar, con la variante de que se coloca la fibra molida y exprimida en capas delgadas sobre papel absorbente y charolas de aluminio a la intemperie, el tiempo de exposición varía de 4-6 horas dependiendo de las condiciones del día.

#### 4.1.2.3.3 Deshidratación por microondas

Secado por microondas: Se utilizaron 3 muestras de 5 g cada una y fueron expuestas a microondas en intervalos de 1 min. Se observó que en el intervalo de 6 minutos la eficiencia del proceso fue la más óptima.

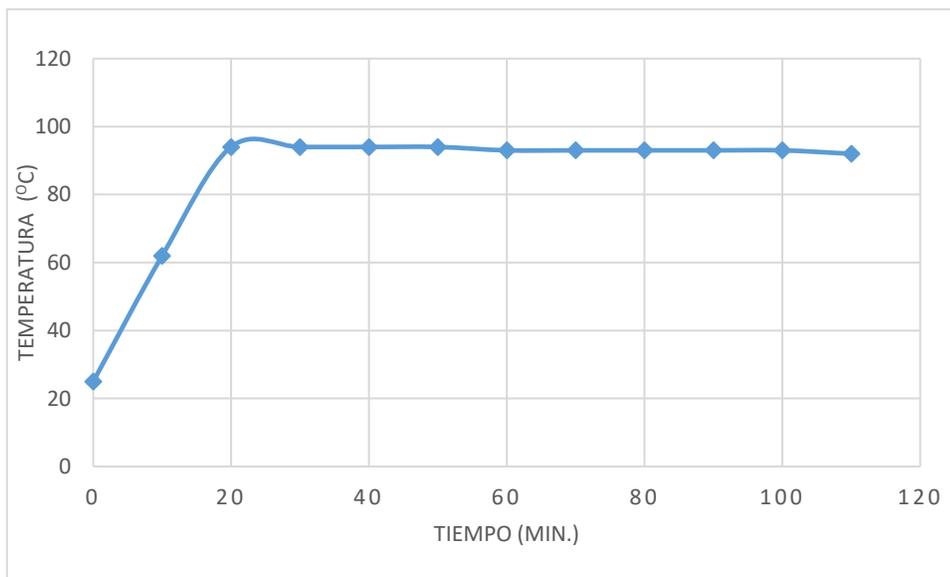
#### 4.1.3 Matriz biopolimérica

La matriz biopolimérica se diseñó con base al aprovechamiento integral de la cáscara de piña ya que se extrajo la fibra y se recuperó también el filtrado de la molienda, el cual contiene pectina y polisacáridos principalmente, como agentes aglomerantes. Dentro de las múltiples opciones en cuanto a la formulación se consideró el uso del Ácido poliláctico de Natural Works (Ingeo 2003) para extrusión, como un agente impermeable contra la humedad y mejora de las propiedades estructurales del laminado. También se utilizaron aditivos como almidón y vinagre.

Las pruebas consideradas para estandarizar el proceso y el control de calidad en cuanto al desarrollo de la matriz fueron:

- ✓ Determinación de grados Brix antes y después de la concentración con aplicación de calor
- ✓ Determinación del pH
- ✓ Determinación de la temperatura óptima de consistencia
- ✓ Determinación de la viscosidad

La matriz se llevó a calentamiento para eliminar el excedente de agua por evaporación, ver **Gráfica 5**.

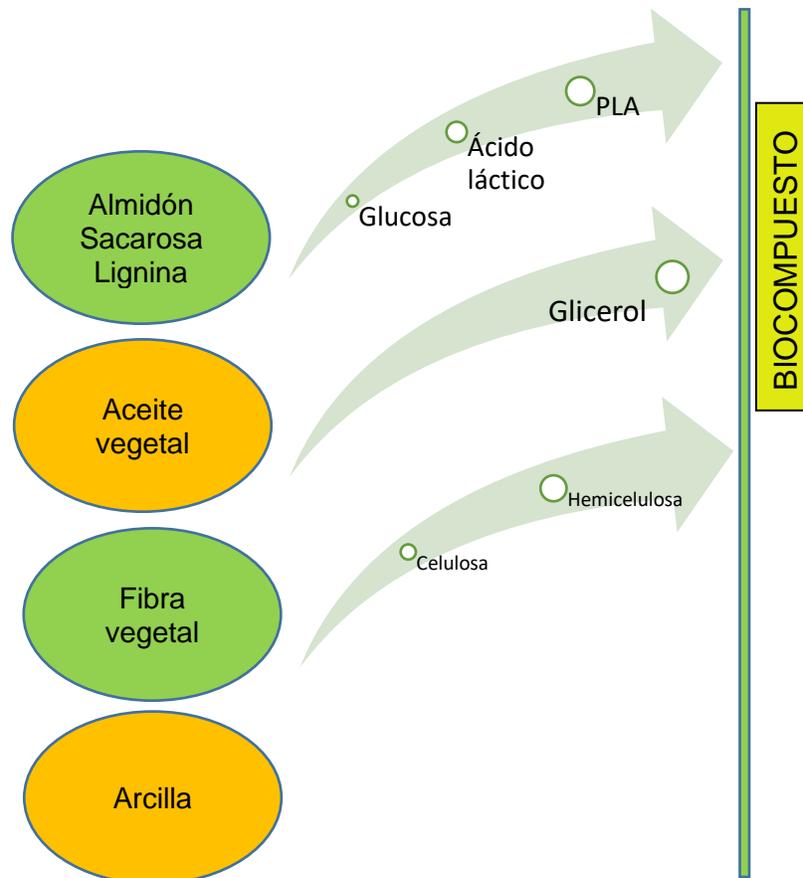


**Gráfica 5.** Concentración por evaporación de la matriz biopolimérica

Fuente: propia, 2018.

Por otro lado, se cuantificó el porcentaje de azúcares, mismos que representan un aumento durante la maduración del fruto alcanzando una concentración de 12-15 %.

La ruta seguida para la formulación converge con dos de las rutas presentadas por Nova-Institute, 2015, en donde se parte de la glucosa derivada de almidón, sacarosa y lignocelulosa, siguiendo la ruta de síntesis del ácido poliláctico (PLA). EL aceite vegetal hacia la ruta de glicerol, finalmente, la fibra vegetal y arcilla como últimos componentes para llegar al biocompuesto. ver **Figura 4.1**.



**Figura 4.1.** Rutas sugeridas para el Biodiseño del biocompuesto  
Fuente: propia, 2019.

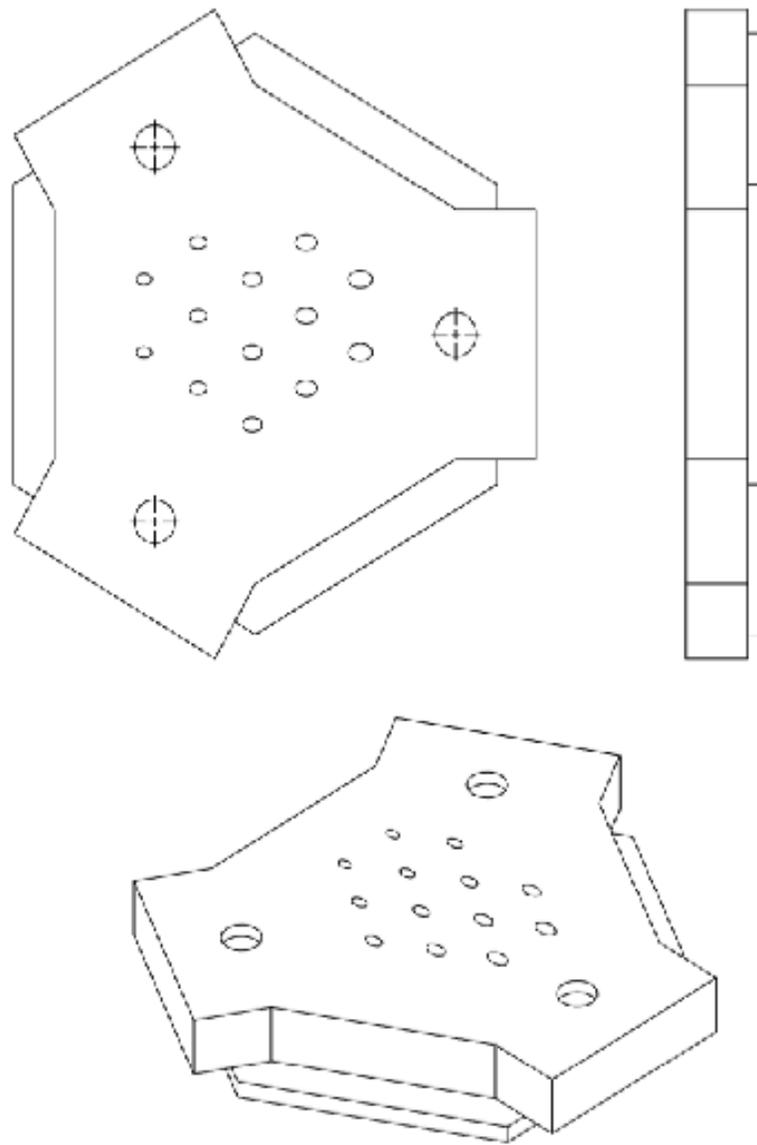
De acuerdo con Yu, *et al*, 2006, se elige el PLA como una matriz viable en combinación con aditivos como el almidón puesto que esta mezcla no afecta las propiedades térmicas y presenta buenos resultados de cristalización a través del método de compresión, a pesar de que no tiene efectos significativos en sus propiedades mecánicas Yu et al [23].

### ***Protocolo para el manejo del Ácido poliláctico Ingeo 2003 D***

- 1). Deberá tener un pretratamiento de secado a 50 °C durante 24 hrs, en estufa
- 2). Mantener a peso constante en desecador
- 3). Guardar en bolsa *ziploc* hasta el momento de su uso
- 4). Especificaciones, ver en **Anexo**
- 5). Se requiere del uso de guantes de carnaza, goggles y cubrebocas para el manejo del biopolímero
- 6). Con base a los metaestados del PLA **Fig. 5.7**, considerar el rango de 70 -110 °C, si se excede por arriba de 218 °C, el biopolímero puede emitir vapores tóxicos
- 7). No adicionar pelets precalentados, ya que, puede haber diferencias en los tiempos de fusión.
- 8). Usar campana de extracción, o área ventilada
- 9). Para retirar los moldes utilizar mordazas o pinzas, mantenerse a distancia del recipiente con agua para sumergir el molde durante el proceso de enfriamiento.
- 10). No inhalar los vapores generados durante la fusión y mezclado, mantenerse a distancia regular, para evitar las salpicaduras de los componentes de la mezcla, por tal motivo es necesario el uso de goggles y cubrebocas.

### ***Diseño Industrial de panel modular***

Una de las propuestas generadas durante el proceso de diseño consistió en paneles modulares de tipo hexagonal presentada ante IMPI (Instituto Mexicano de la Propiedad Intelectual), con observaciones en la primera fase, ver **Fig. 4.2**.



**Figura 4.2.** Propuesta geométrica de Diseño industrial  
Fuente: Propia, 2018.

#### 4.1.4 Proceso de laminado,

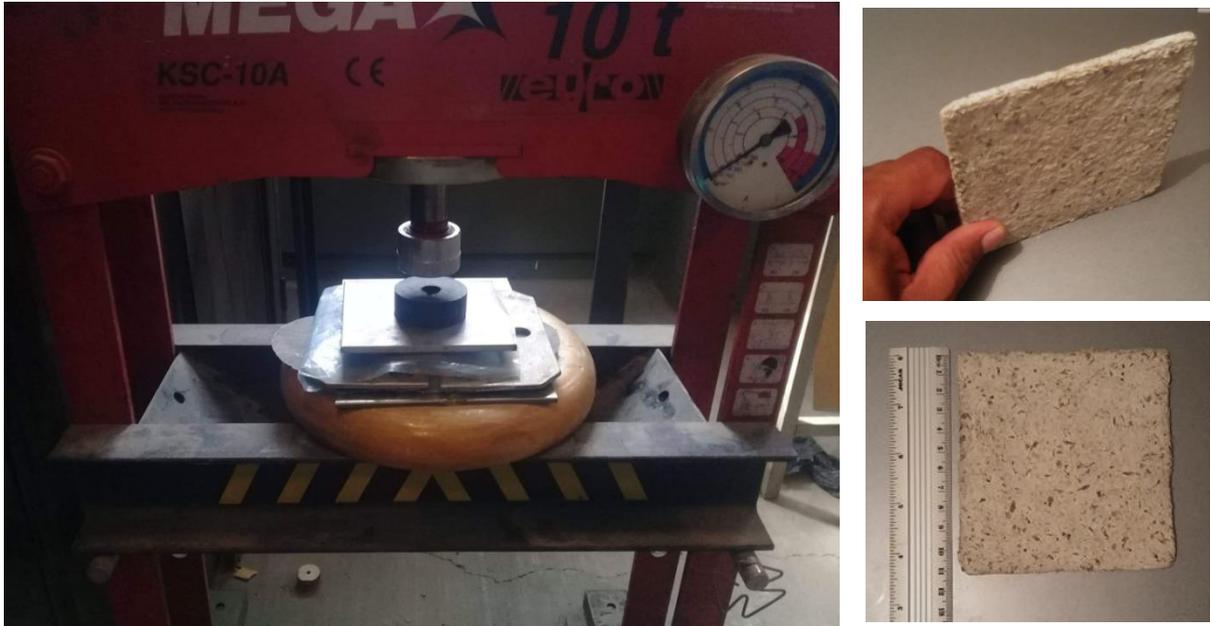
En las primeras fases del proceso de laminado se propuso un molde de tipo cilíndrico en acero inoxidable con tapa inferior y émbolo de goma para la compresión adaptado a la prensa hidráulica MEGA KSC-10A, ver **Fig. 4.3 A, B**. El molde **C, D** corresponde a la segunda propuesta definitiva para laminados de 11x12 cm y espesores de 2-4 mm. Esta última propuesta es aplicable para compresión en frío y en caliente.



**Figura 4.3.** A, B, C, D. Moldes utilizados para el método de termocompresión en placa  
Fuente: propia, 2019

El proceso de laminado consistió en el uso de los moldes **C y D** en una prensa hidráulica modelo MEGA KSC-10A, ejerciendo una presión de 50 Kg/cm<sup>2</sup> en el biocompuesto, como resultado del proceso se obtuvieron laminados de 4 mm de espesor.

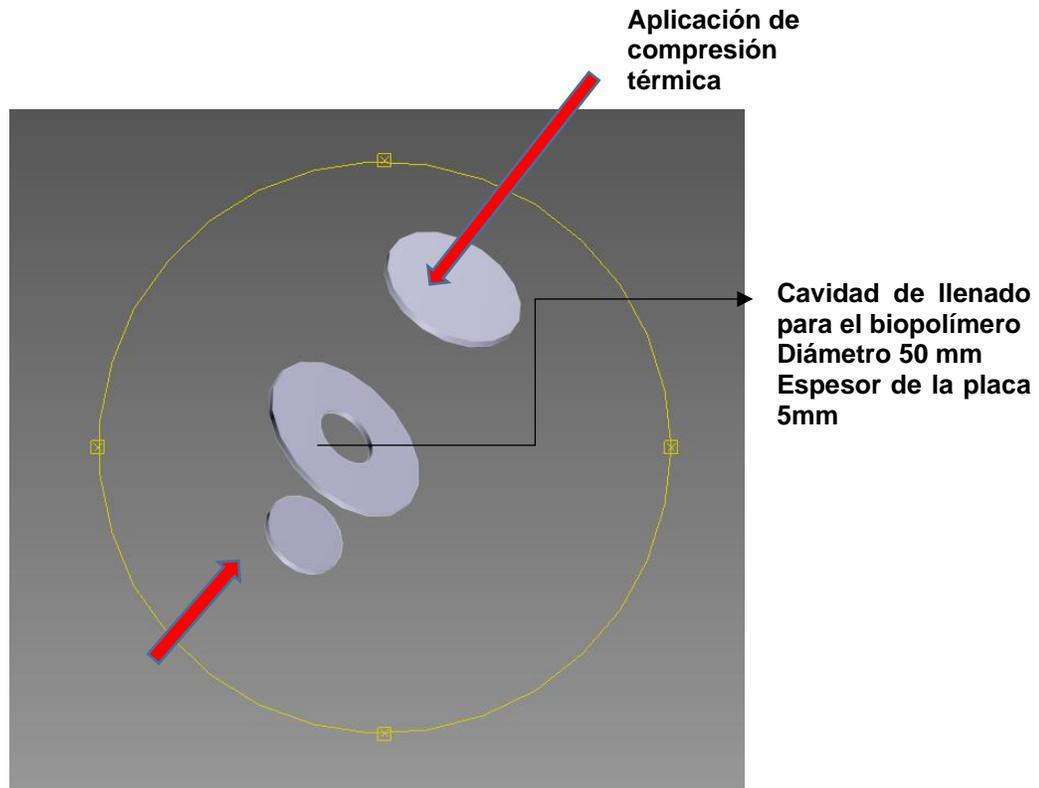
Nota: en la **Fig. 2** se puede apreciar el proceso de laminado, el cual puede ser aplicado en frío y en caliente.



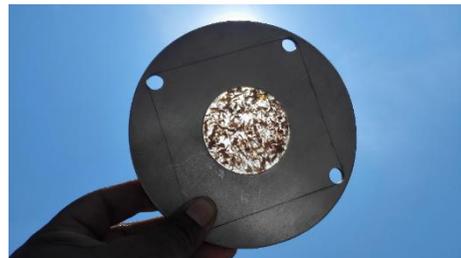
**Figura 4.4.** Moldeo por compresión, prensa hidráulica MEGA KSC-10A Presión de 50 Kg/cm<sup>2</sup>  
Fuente: Taller de metales. Diseño Industrial. Centro Universitario UAEM Valle de Chalco, 2019.

#### *Variante de Diseño de molde circular para laminado en stacks*

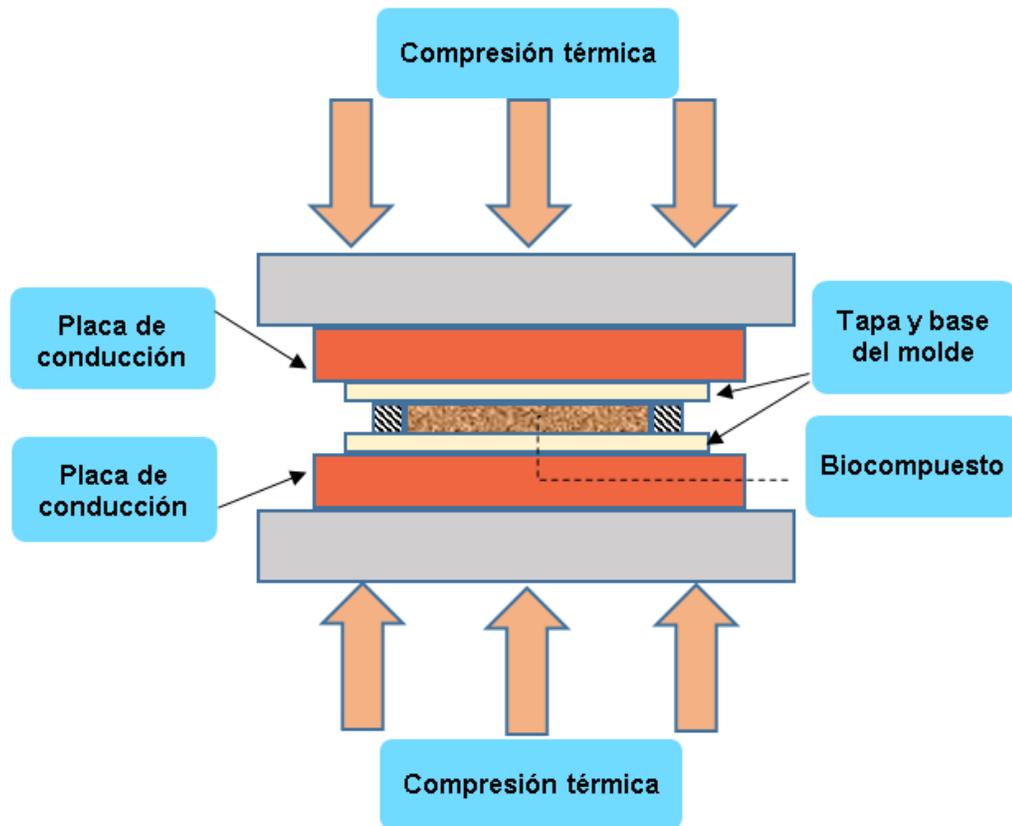
Una tercera variante consistió en un molde circular en placas de acero inoxidable con un diámetro de 5 cm y espesor de 4 mm. Esta propuesta funcionó para pruebas de encapsulado de la fibra en una matriz de PLA Ingeo 2003 y otras pruebas por termocompresión, ver **Figuras 4.5 y 4.6 y Figura 4.7** de detalle transversal.



**Figura 4. 5.** Diseño de moldes circulares de prueba de acero inoxidable para termo-compresión  
Fuente: propia, 2019.



**Figura 4.6.** Moldes circulares (usando PLA como matriz biopolimérica)  
Fuente: propia, 2019



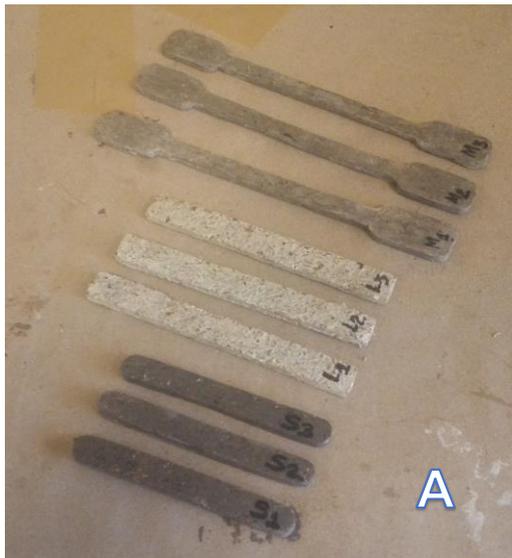
**Figura 4.7.** Detalle transversal del conformado térmico del biocompuesto  
Fuente: propia, 2019.

## 4.2 Pruebas Mecánicas

El equipo planteado para la determinación de las propiedades de tensión es una máquina universal de pruebas mecánicas con la velocidad de separación de mordazas de 1 mm/min. Las probetas para la prueba de forma rectangular de 1 x 7 cm con medición del espesor para calcular el área de la sección transversal de la probeta. En esta prueba de tensión se realizarán los cálculos para la determinación de resistencia a la tensión, elongación a la ruptura y módulo de elasticidad.

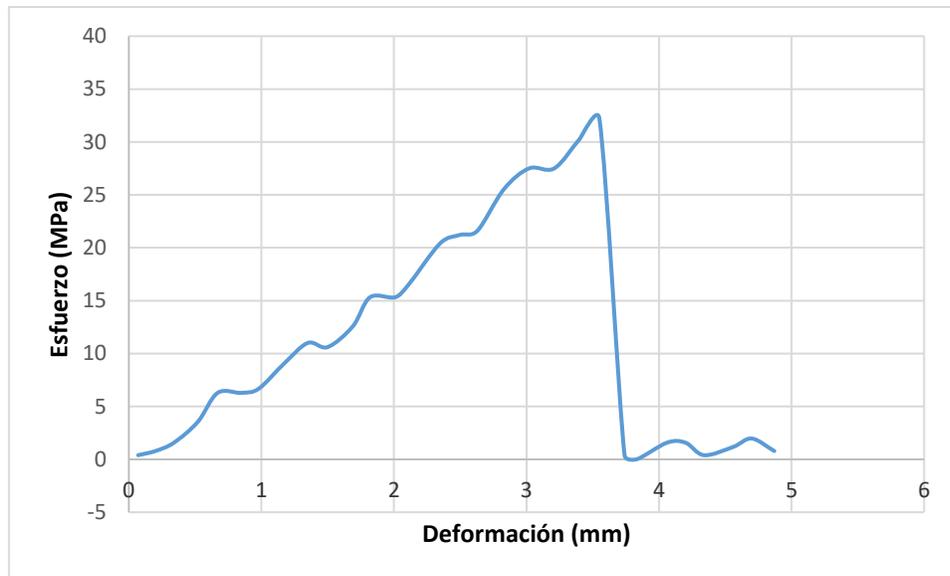
#### 4.2.2 Método de prueba estándar para propiedades de tracción de plásticos (ASTM D638-10).

Se desarrollaron probetas con molde facilitado en la Facultad de Materiales el Rosedal, UAEMEX:

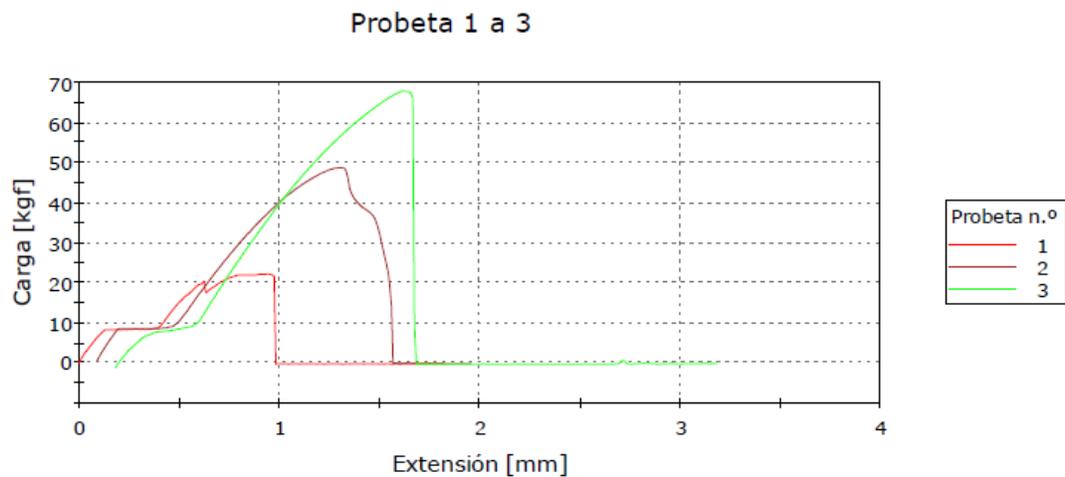


**Figura 4.8.** A, B, detalle de probetas  
Fuente: propia.

Se obtuvieron los siguientes resultados:



**Gráfica 6.** Esfuerzo vs deformación, biocompuesto /PLA 70%  
Fuente: Facultad de Materiales, UAEMEX, el Rosedal, 2019.



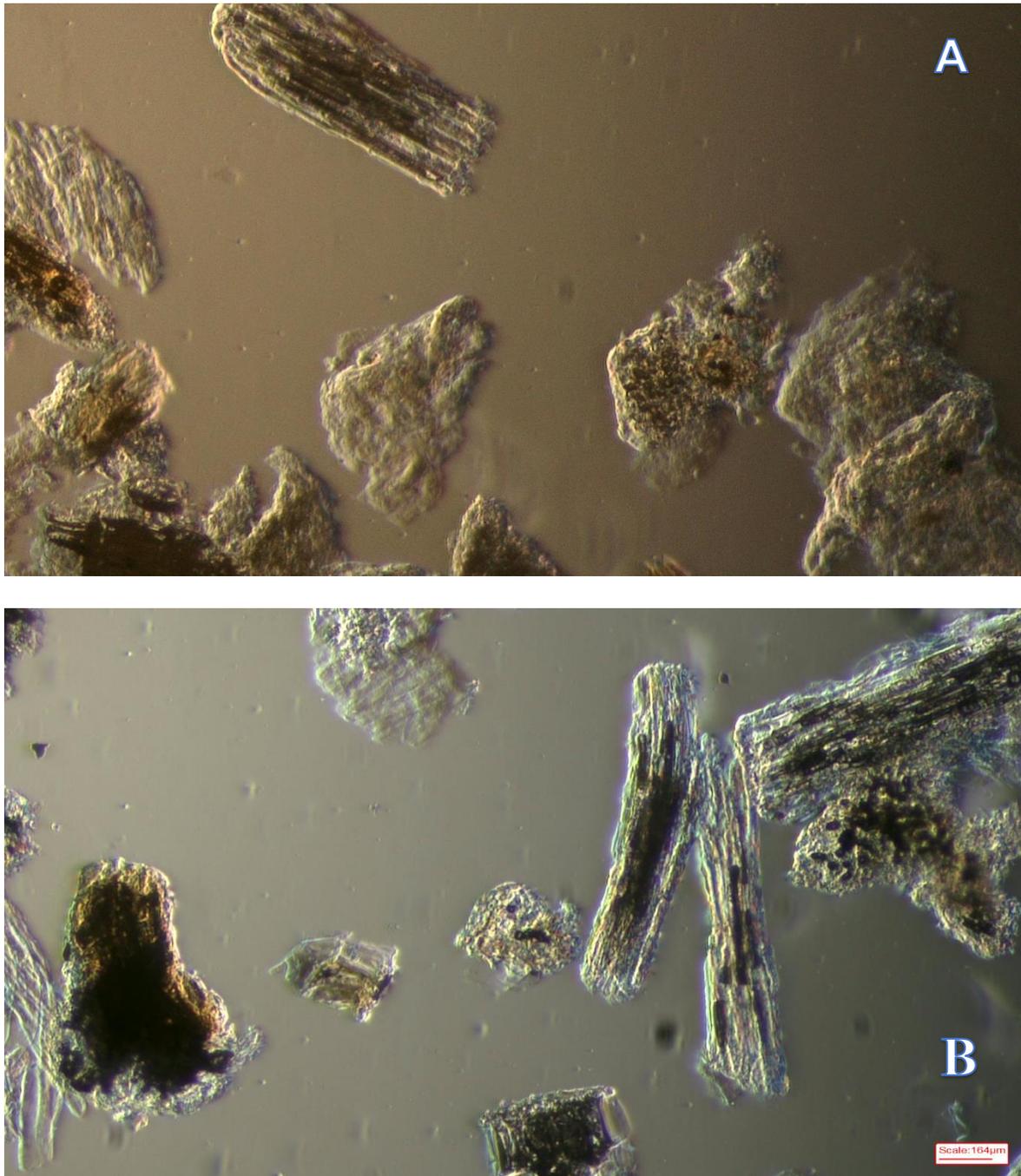
**Gráfica 7.** Resultados de tensión para la segunda formulación que incluye 30% de PLA  
Fuente: Centro Conjunto de Investigación en Química Sustentable (CCIQS)  
UAEM-UNAM, El Rosedal, 2019. Equipo utilizado: Máquina Universal de Pruebas Mecánicas Instron  
3382

El valor máximo de Tensión promedio de las muestras 1 y 2 corresponde a: 19.27MPa.

En ésta segunda formulación se calculó el Módulo elástico cuyo valor corresponde a 0.78-1.59 GPa.

### 4.3 Análisis Microscópico

En la fase experimental de microscopía se revelan surcos en las partículas de cáscara de piña, ver **Fig. 4.9. A y B.**



**Figura 4.9.** A, B. Cáscara de piña particulada y tamizada en malla 250, imagen en 4X, Microscopio biológico Olympus BX51.

Fuente: Facultad de Ciencias, Laboratorio de Nanobiotecnología, 2017.

En la **Figura 4.10**, se observa la integración de la matriz polimérica con las partículas de cáscara de piña.



**Figura 4.10.** Estructura del Bipolímero/Cáscara de piña imagen tomado con estereoscopio  
Fuente: Facultad de Ciencias, Laboratorio de Nanobiotecnología, 2017.

También, se observan algunos gránulos residuales de azúcar como componente en las primeras propuestas, también se nota la unión de las partículas de la cáscara de piña con el biopolímero.

#### 4.4 Determinación de absorción de agua

El efecto de la absorción de agua en los composites propicia la degradación de la interface fibra- matriz, provocando una disminución de las propiedades mecánicas, dimensionales y térmicas. Esta problemática puede ser reducida con los tratamientos de superficie de la fibra y por la incorporación de agentes acoplantes. Los mecanismos que rigen este fenómeno de absorción son los siguientes:

- ✓ La difusión de las moléculas de agua entre las cadenas poliméricas y en los inter espacios.
- ✓ Transporte por capilaridad en los huecos y defectos de las interfaces entre fibra y matriz como resultado de la pobre humedad e impregnación durante el proceso de manufactura inicial.
- ✓ Transporte a través de microcraquelado en la matriz surgiendo como resultado el hinchamiento de las fibras. En general la difusión de la humedad de la fibra depende de la fracción en volumen de la fibra, huecos, viscosidad de la matriz, humedad y temperatura.



La prueba se llevó a cabo con 5 muestras a través de un procedimiento adaptado de la Norma ASTM D570-98. Las probetas se cortaron con las siguientes dimensiones: 60 x 10 mm y se pesaron, después fueron sumergidas en agua destilada a temperatura ambiente, las muestras se pesaron en diferentes intervalos de tiempo y el aumento de peso correspondió a la absorción de agua de la muestra (A %).

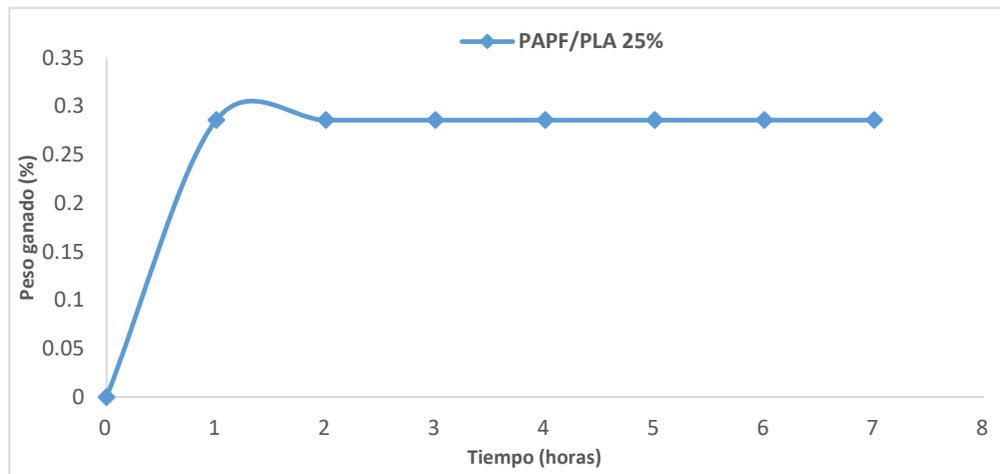
**Figura 4.11.** Pesado de las probetas en el ensayo de absorción de agua.

Fuente: CU, Valle de Chalco, Lab. Biotecnología, 2019.

Como se muestra en la ecuación, las variables  $m_t$  es el peso medido a la muestra en diferentes intervalos de tiempo hasta alcanzar la máxima absorción de agua y  $m_o$  el peso inicial:

$$A (\%) = (m_t - m_o) / m_o \times 100 \quad [45]$$

Se llevo a cabo las lecturas en balanza de precisión y se obtuvo la **Gráfica 8**.



**Gráfica 8.** Determinación de absorción de humedad en muestras con 25 % PLA.

Fuente: CU, Valle de Chalco, Laboratorio de Ciencias Básicas y Biomédicas, 2019.

#### 4.5 Determinación de la conductividad térmica

La conductividad térmica se define como el flujo de calor en estado estacionario que pasa a través de una unidad de área de un material homogéneo, 1 m de espesor inducida por la diferencia de 1 grado Kelvin. Un material es considerado como un aislante térmico si su valor de conductividad térmica es de 0.07 W/Mk.

Con la determinación de este factor se tiene la posibilidad de mejorar la sostenibilidad energética de la envolvente constructiva, a partir del manejo del desarrollo de materiales. La sustentabilidad actual de los materiales de aislamiento se encuentra relacionada con su disponibilidad y su fabricación en el lugar de cosecha para minimizar gastos de transporte [46]. La incorporación de aislantes de tipo natural surge a partir de

la introducción del concepto de sostenibilidad, sobre todo en aquellos países que no tienen bien definidas sus políticas de reciclaje lo que causa problemáticas de eliminación de subproductos agrícolas. De acuerdo con [47], muchos aislantes térmicos tienen alto impacto ambiental y alta energía incorporada, por lo que con las fibras vegetales se tiene la posibilidad de aislar con menor impacto, sobre todo si las fibras se obtienen a nivel local. Muthuraj et al. [48] menciona que los aislantes térmicos convencionales tienen la desventaja, que durante su aplicación, reducen el espacio vital, son pesados y son costosos y que por seguridad ambiental y desarrollo sostenible se buscan nuevos materiales de aislamiento térmico provenientes de fuentes renovables que optimicen tanto espacio como energía.

#### Beneficios del aislante térmico ecológico

- ✓ Son biodegradables y amigables con el medio
- ✓ De bajo costo a nivel energético, sin embargo, la lana de roca o fibra de vidrio tienen altos costos energéticos, porque se tiene que fundir vidrio por encima de 100 °C.
- ✓ Los aislantes térmicos ecológicos presentan una gran capacidad térmica, aproximadamente 3 veces superior a los aislantes tradicionales
- ✓ Son de alta densidad y por consiguiente también son buenos aislantes acústicos
- ✓ Permiten la transpiración de la casa por lo que mantienen el ambiente fresco varias horas
- ✓ Su perduración es ilimitada a comparación de los aislantes tradicionales
- ✓ Absorben la humedad dando un mayor confort

#### Ejemplos de aislantes ecológicos

- ✓ Aislante térmico ecológico de corcho  
Coeficiente K: 0.045 W/m K Energía incorporada: 837 wh/kg
- ✓ Cañamiza  
Coeficiente K: 0.041 w/m K Energía incorporada: 252 wh/kg
- ✓ Lino  
Coeficiente K: 0.040 w/m K Energía incorporada: 253 wh/kg

- ✓ Fibra de madera
  - Panel con fibra de madera con yeso o cemento blanco
  - Coeficiente K: 0.040 w/m K Energía incorporada: 253 wh/kg
  - Panel con fibra de madera
  - Coeficiente K: 0.05 w/m K Energía incorporada: 492 wh/kg
- ✓ Aislante térmico con celulosa
  - Coeficiente K: 0.04 w/m K Energía incorporada: 664 wh/kg
- ✓ Aislante térmico con lana
  - Coeficiente K: 0.04 w/m K Energía incorporada: 664 wh/kg
- ✓ Aislante térmico con balas de paja

#### 4.6 Propuesta final de diseño



**Figura 4.12.** Propuesta de aplicación en interiores como panel divisorio.  
Fuente: Jiménez, 2018.



**Figura 4.13.** Propuesta de aplicación como recubrimiento  
Fuente: Calderón, 2019.



**Figura 4.14.** Propuesta de aplicación como recubrimiento  
Fuente: Calderón, 2019.

## Aplicabilidad del biocompuesto

Con base a los criterios de los sectores de aplicación, vida útil, seguridad y Diseño, (**Tabla 12**) se plantea el uso del biocompuesto en construcciones de baja energía, de montaje rápido, construcción modular altamente eficiente con elementos prefabricados. usando subproductos de la piña (cáscara), mezclas de arcilla y otros aditivos.

**Tabla 12**

Propiedades de los materiales compuestos con base en los diferentes sectores de aplicación

	Aeronáutica	Automotriz	Ferrocarriles	Construcción	Industria	I. Naval	Medicina	Electricidad y electrónica	Deportes
<b>Vida útil</b>									
Rigidez				X		X	X	X	X
Resistencia mecánica				X	X	X	X		X
Resistencia a la fatiga	X					X			
Resistencia a la corrosión	X	X		X		X	X	X	
Impermeabilidad				X	X				
<b>Seguridad</b>									
Resistencia a los choques		X				X	X		X
Resistencia al fuego	X		X	X	X			X	
Aislamiento térmico				X	X			X	
Aislamiento eléctrico								X	
Amortiguamiento, vibraciones					X				X
<b>Diseño</b>									
Integración de funciones	X	X						X	
Formas complejas	X	X	X	X					X
Transparencia ondas electromagnéticas								X	
Disminución del peso de las estructuras	X	X							X

Fuente: Béguin, 2002, en [49].

## V. DESARROLLO METODOLÓGICO PARA EL ECODISEÑO

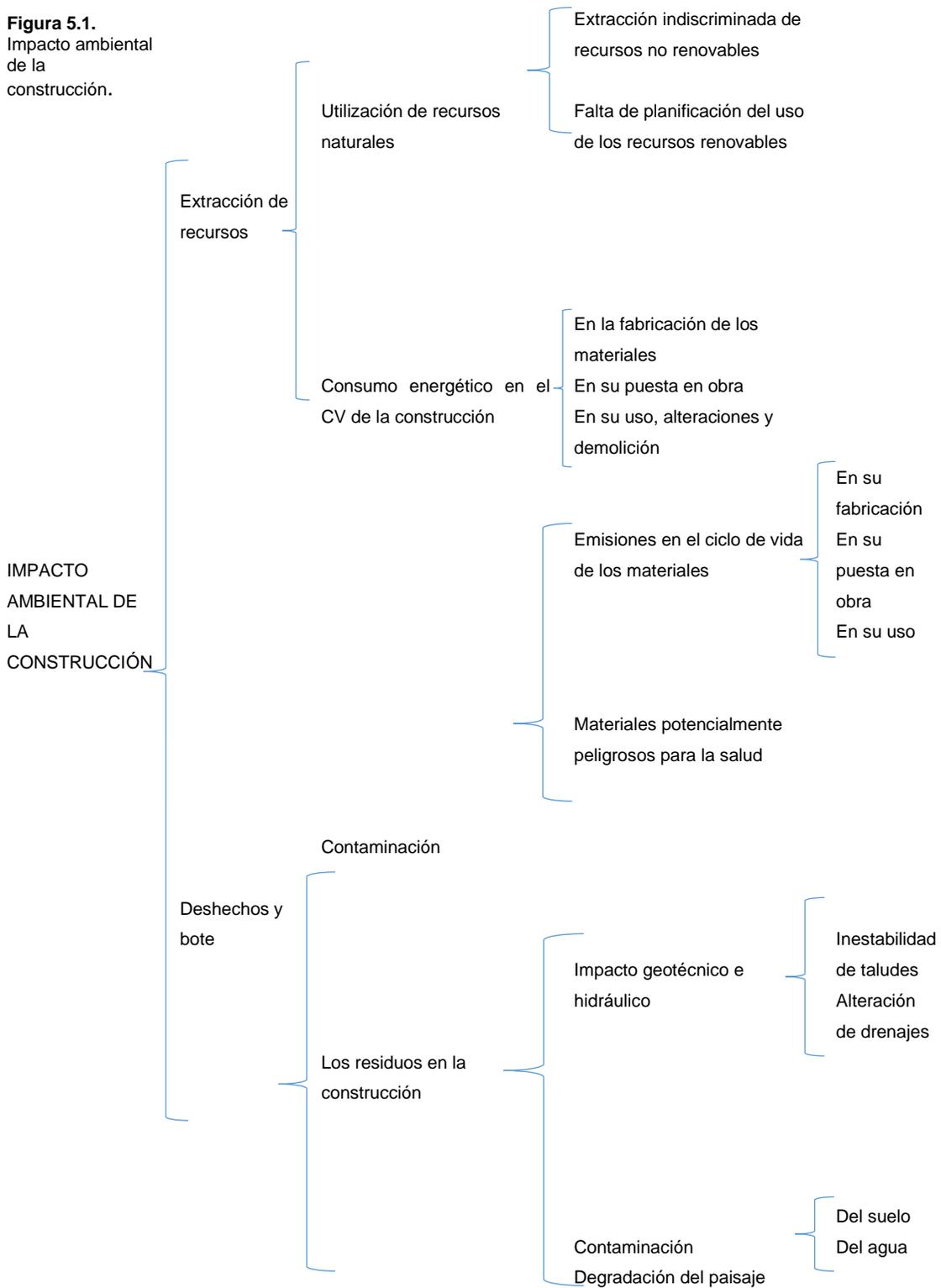
### Introducción

El alto consumo de recursos energéticos y de origen natural genera elevadas cantidades de residuos e impactos ambientales, sobre todo en el sector de la construcción, lo que hace de éste sector uno de los menos sostenibles [50]. De acuerdo con Dixit [51] la industria de la construcción es uno de los sectores que más consume recursos naturales, tanto renovables como no renovables, la cual consume el 40 % de la energía total, el 16% de agua anual, aunado a ello, el 35 % de las emisiones de gases son producidos tan solo en Europa [52].

La mayoría de los productos de construcción, sistemas o edificios, generan un impacto ambiental como la producción de gases de efecto invernadero, es por ello que se requieren materiales inteligentes y eficientes para disminuir los altos requerimientos energéticos para la calefacción, ventilación y aire acondicionado [53].

De las actividades a considerar en etapas tempranas de la construcción es el ciclo de vida de los materiales, dado que la mayoría de los impactos en el medio ambiente se generan desde las etapas de extracción hasta el vertido de residuos, cabe señalar que durante esta línea se involucra el gasto energético, la contaminación generada por los residuos, con consecuencias en el medio natural y modificado [54]. Ver **Fig. 5.1**.

**Figura 5.1.**  
Impacto ambiental  
de la  
construcción.



Fuente:  
Acosta [54].

Con el fin de minimizar los niveles de CO<sub>2</sub> se han desarrollado estrategias desde la panorámica del diseño por durabilidad y diseño sustentable e inteligente basadas en el modelo LEED<sup>®</sup>, adaptado al contexto mexicano por los autores Hernández, Hernández y Alcaraz [59].

Con base al estudio de Jiménez [52] la metodología (CML), del Instituto de Ciencias Medioambientales de la Universidad de Leiden en los países bajos, considera los factores de impacto ambiental, con las siguientes categorías:

- ✓ **Agotamiento de Recursos Abióticos (ADP).** Los recursos abióticos son aquellos que rodean a los seres vivos y junto con ellos integran un ecosistema; los recursos abióticos incluyen todos los recursos “sin vida” que pueden ser explotados por el hombre entre ellos los recursos energéticos. El potencial de agotamiento abiótico, llamado ADP de sus siglas en inglés, es medido en cantidad de Sb equivalente por cantidad de recurso.
- ✓ **Acidificación (AP).** Es el resultado de la emisión de contaminantes de carácter ácido, tales como SO<sub>2</sub> o NO<sub>x</sub>, a la atmósfera, algunos ejemplos de ello son: Nitratos, Sulfatos, la unidad de medición de este impacto es Kg de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) equivalente por Kg de emisión.
- ✓ **Eutrofización (EP).** Categoría referida al impacto sobre los sistemas acuáticos como resultado de la acumulación de (materia orgánica y mineral), lo que incrementa el crecimiento de las plantas, este efecto reduce los niveles de oxígeno en el medio acuoso. Los principales indicadores de este impacto son el Nitrógeno y Fósforo. Este impacto se cuantifica en Kg equivalentes de PO<sub>4</sub>.
- ✓ **Cambio climático (GWP).** Referido a daños en la salud de las personas, derivadas del cambio climático, ejemplos: CO<sub>2</sub>, cloroformo o butano. La unidad definida está dada en Kg de CO<sub>2</sub> equivalentes por Kg de emisión.
- ✓ **Destrucción de la capa de ozono (ODP).** Se refiere a la reducción del espesor de la capa de ozono, derivado de la emisión de sustancias químicas que reducen el espesor de la capa de ozono, estas producen daños en el ser humano debido a la exposición a los rayos UV, algunas sustancias como CFC's (Cloro fluoro carbonos), cuya medición se basa en los Kg de CFC-11 equivalentes por Kg de emisión.

- ✓ **Formación fotoquímica de ozono (POCP).** Los óxidos de Nitrógeno (Nx) bajo la influencia de la radiación solar, reaccionan con los compuestos orgánicos volátiles (COVs) para producir ozono troposférico. El POCP es usado como factor de caracterización de fotooxidantes, expresado en Kg de etileno equivalente por Kg de sustancia emitida.
- ✓ **Toxicidad humana.** Que hace referencia a las sustancias peligrosas para el ser humano (HTP) y para los ecosistemas acuáticos (FAETP y MAETP), para ecosistemas terrestres (TETP). La perspectiva analizada para estas tres categorías es a 20 años.

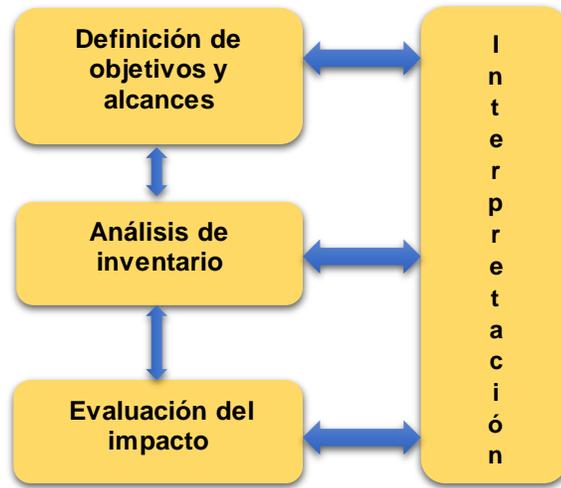
### 5.1 Análisis de Ciclo de vida (ACV)

La vivienda es un producto que utiliza elevada cantidad de materia y energía a lo largo de su ciclo de vida tanto para su construcción como para su mantenimiento y uso. En las viviendas, todo el consumo está relacionado con el diseño original por lo que se requiere tener visión de largo plazo. Una planeación adecuada de los materiales de construcción colores y orientación dado que con ello se puede reducir el gasto energético, mantenimiento, costos y por ende el impacto ambiental.

La industria de la construcción es la que más recursos naturales emplea, con base a ello, se ha optado por mejorar la eficiencia energética desde la fase de diseño de las construcciones con el uso de la metodología de Análisis de Ciclo de vida (LCA) y base de datos de Declaraciones Ambientales de Producto (EPD) Basado en la elección de materiales de bajo consumo energético durante su ciclo de vida. El análisis de ciclo de vida, comprende la determinación de entradas y salidas de un producto o sistema durante su ciclo de vida.

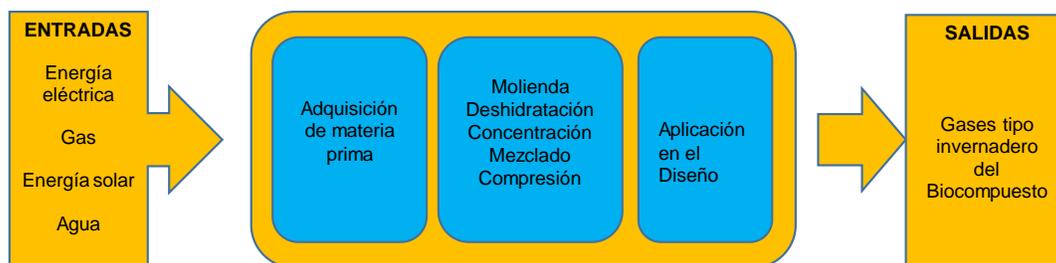
El primer paso para el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) consiste en definir el objetivo y el alcance, los límites del sistema para el producto, los impactos ambientales, la unidad funcional expresada en términos cuantitativos y el nivel de detalle del inventario [55].

Este tipo de estudio comprende cuatro fases, **Fig. 5.2.**



**Figura 5.2.** Proceso de evaluación del ciclo de vida  
Fuente: [55].

El segundo paso es el análisis del inventario de ciclo de vida, que incluye la recopilación y el cálculo de los datos de entrada y salida del sistema, ver **Fig. 5.3.**



**Figura 5.3.** De la cuna a la puerta (Cradl to gate)  
Fuente: propia, 2018.

En el biocompuesto en estudio se tiene una aproximación en la fase “desde la cuna a la puerta”, que se inicia desde el proceso de extracción hasta el acabado del producto, para éste segundo paso, se desarrolló un diagrama de ciclo de vida **Fig. 5.4**, que considera

diferentes fases del ciclo de vida del producto, facilitando así la recopilación de datos en las diferentes áreas de enfoque.



**Figura 5.4.** Ciclo de vida del producto.  
Fuente: Elaboración propia.

El tercer paso es la evaluación del impacto del ciclo de vida, es decir, interpretar los datos inventariados del impacto ambiental del producto, posteriormente se calcula el indicador de categoría de emisiones y recursos, conocido como factor de caracterización [55]. En este contexto, el factor de caracterización del calentamiento global es el GWP.

**Definición del producto:** Panel aislante térmico

**Unidad funcional seleccionada:** 1 m<sup>2</sup> de material aislante.

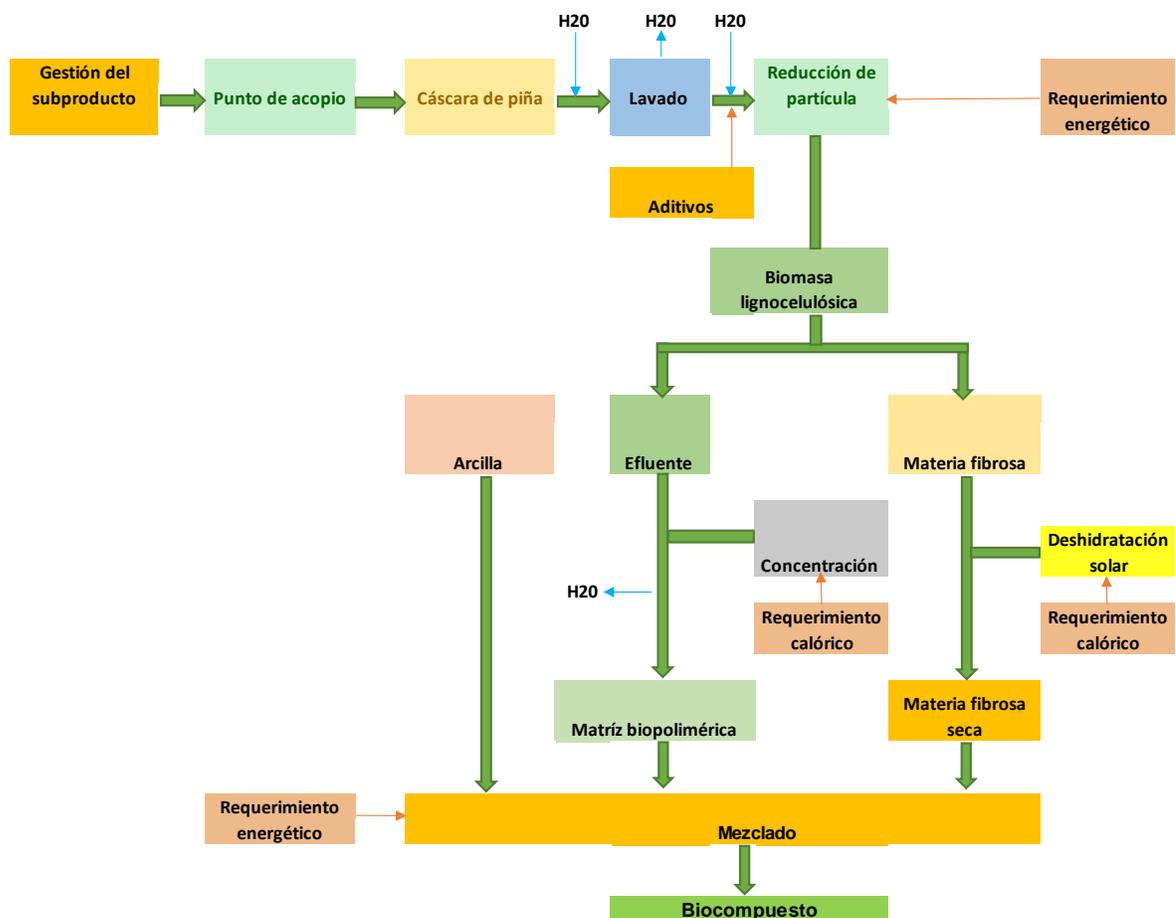
**Objetivo:** Determinar una aproximación a la EPD del biocompuesto pineapanel dirigido a la industria de la construcción, a partir del Sistema de la Cuna a la Puerta (*Cradl to gate*).

**Alcance:** Llevar a cabo un estudio piloto para la determinación del indicador ecológico adecuado para la validación de la huella ecológica del producto.

### Diagrama de proceso

El proceso consta principalmente de los siguientes pasos:

1. Gestión y acopio de del subproducto cáscara de piña.
2. Pretratamientos (lavado, molienda, deshidratación) con recuperación de la parte fibrosa y el efluente.
3. Concentración de la matriz biopolimérica (efluente y aditivos).
4. Mezclado de los componentes (fibra deshidratada y matriz biopolimérica)
5. Incorporación del PLA.



**Figura 5.5.** Proceso de obtención del biocompuesto  
Fuente: propia, 2018.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Después de la caracterización de la cáscara de piña, se encontró que, de un peso inicial húmedo de 485 g, equivalente al 30% del peso total de la piña, se obtuvo un rendimiento de fibra seca de 17.5 g, ver **Fig. 5.6**, este dato es muy significativo para el proyecto ya que da una panorámica más amplia para determinar las posibles aplicaciones del biocompuesto.

Con respecto a la deshidratación por microondas como un método alternativo, se identificó que para este método las exposiciones deben de ser en tiempos cortos de un minuto cada una, según los resultados obtenidos se determinaron seis exposiciones después de las cuáles ya no había cambio en el peso de las muestras.



**Figura 5.6.** Cáscara de piña Ananas comosus (fruto y cáscara molida)  
Fuente propia, 2019.

Con respecto a la caracterización de la matriz biopolimérica, se le realizaron las siguientes determinaciones: pH, grados Brix, densidad aparente, viscosidad aparente y temperatura óptima de concentración, ver **Tabla 13**.

**Tabla 13**

Caracterización de la matriz biopolimérica de cáscara de piña.

Determinación	Resultado	Funcionalidad
pH	3.2	Hidrólisis del almidón y Control de microorganismos
Grados Brix	14	Representa el contenido de azúcares expresados en % de sacarosa, útil para la aglomeración y enlace, como sustituto de los polímeros derivados del petróleo.
Densidad aparente	1.093	Relación entre el peso de la muestra en gramos y su volumen en centímetros cúbicos.
Viscosidad aparente	1.0918 cp a 22 °C	Parámetro que representa el esfuerzo al corte.
Temperatura de concentración	89-95 °C	Eliminar el agua que puede ser utilizada por los microorganismos manteniendo un 10-20 % de humedad para mezclar los demás aditivos.

Fuente: Laboratorio 4. IBQ. Juan García Ávila. Fac. Química Campos el Cerrillo, Piedras Blancas  
Laboratorio de Nanocompuestos Facultad de Ciencias Campos el Cerrillo, Piedras Blancas.

Se observa que el medio ácido presentado por la matriz biopolimérica en estado líquido facilita la hidrólisis de los componentes del almidón y por otro lado contribuye al control de los microorganismos que puedan afectar su conservación.

La determinación de grados Brix en las grandes industrias de procesamiento de frutas contribuye a una medida del nivel de azúcares expresado en porcentaje de sacarosa, contribuye a verificar la conservación del fruto en el caso de la piña es de 12 °Brix, para el caso de la matriz biopolimérica se alcanzó una concentración de 14 °Brix.

Las determinaciones de densidad aparente, viscosidad aparente y temperatura de concentración son indicadores del control de calidad del proceso, cabe mencionarse que en éste último proceso se elimina gran cantidad del agua que podría contribuir al desarrollo de microorganismos.

En cuanto a la determinación de conductividad térmica se encontró que el biocompuesto entra dentro del rango de conductividades presentadas por materiales aislantes comerciales, a continuación, se presenta la comparativa en la **Tabla 14**.

**Tabla 14**

Resultados conductividad térmica ( $\lambda$ ), densidad ( $\text{g/m}^3$ ), espesor (cm), de diferentes materiales, requerido para lograr un valor u de  $0.3\text{W} / \text{m}^2\text{K}$

Material	Conductividad térmica (W/mK)	Densidad ( $\text{g/m}^3$ )	Espesor (cm)
Biocompuesto piña	0.048	-	0.4
Lana de oveja	0.045	38.8	13.8
Pacas de paja	0.054	133	16.6
Fibra de madera	0.038	50	11.7
Fibra de vidrio	0.04	18	12.3
Poliestireno extruido	0.043	10	13.2
Poliuretano	0.026	40	8.0

Fuente: modificado de (Petit-breuilh et al., 2013, pág 5).

Derivado de esta tabla se puede observar una conductividad térmica del biocompuesto muy cercana a los materiales aislantes de lana de oveja, fibra de vidrio y poliestireno extruido, pero con una diferencia considerable en cuanto al espesor.

Durante la experimentación se llevó a cabo una serie de formulaciones, ver **Tablas 15-17**.

**Tabla 15****PRUEBA 1(Usa de Arcilla Old mine #4)**

Componente	Porcentaje	Peso (kg)
Cáscara de piña	19.49	1.06
Arcilla Old Mine #4	45	2.44925
Matriz biopolimérica	35.47	1.92925
Total Masa incorporada	100	5.4385

**Tabla 16****Componentes de la matriz biopolimérica**

Componente	Proporción en peso (kg)	Porcentaje (%)
Cáscara de piña	0.52	21
Agua de grifo	1.8	74
Vinagre	0.08925	3.5
Harina	0.04	1.5
Total	2.44925	100

**Tabla 17****Experimentación con otros componentes****PRUEBA T1**

Componente	Porcentaje (%)	Peso (g)
Cáscara de piña	3.3	3.77
Arcilla Old Mine #4	45.7	52.3
Cemento Portland	5.0	5.71
Matriz biopolimérica	45	51.43
Carbonato de Calcio	1.0	1.1

**PRUEBA T2**

Componente	Porcentaje (%)	Peso (g)
Cáscara de piña	3.1	3.77
Arcilla Old Mine #4	16.4	20
Barro de Oaxaca	32.8	40
Matriz biopolimérica	42.1	51.43
Cemento Portland	4.6	5.71
Carbonato de Calcio	1.0	1.1

## PRUEBA T3

Componente	Porcentaje (%)	Peso (g)
Cáscara de piña	3.0	3.77
Arcilla Old Mine #4	15.8	20
Barro de Oaxaca	39.5	50
Matriz biopolimérica	40.7	51.43
Cemento Portland	0	0
Carbonato de Calcio	1.0	1.1

## PRUEBA T4

Componente	Porcentaje (%)	Peso (g)
Cáscara de piña	7.6	7
Arcilla Old Mine #4	5.4	5
Barro de Oaxaca	27.2	25
Matriz biopolimérica	32.6	30
Cemento Portland	0	0
Carbonato de Calcio	27.2	25

Nota: en ésta muestra prueba se colocó un stack de fibra en el centro (tipo *sándwich*).

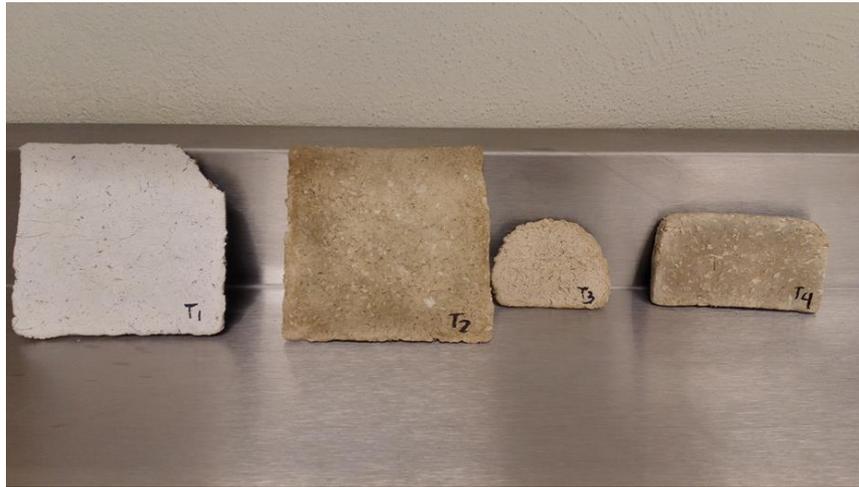
Análisis de resultados: pruebas **T1** y **T4** presentan menor flexibilidad.

Prueba **T1**. El aroma a piña se pierde, coloración clara, superficie más lisa y su resistencia es alta, su peso es más alto que presentado por las demás pruebas. La absorción de agua es elevada a los 10 minutos, presenta burbujeo por el tipo de prensado manual.

Prueba **T2**. Presenta mayor flexibilidad y su estructura presenta mayor agrietamiento, conserva ligeramente el aroma a piña, coloración kaki, su resistencia es media, estructuralmente es mejor que **T1**, la absorción de agua muy elevada.

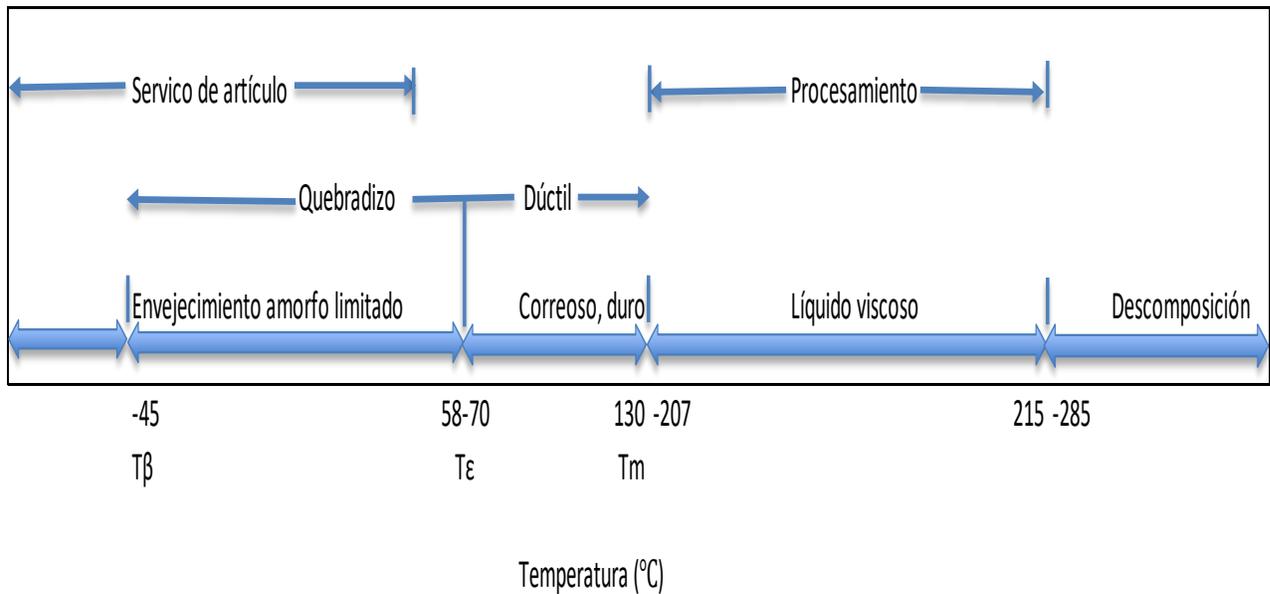
Prueba **T3**. Puede moldearse a espesores mínimos, 2 mm, tiene mayor flexibilidad que **T2** pero presenta una resistencia menor, alta absorción de agua a los 10 min.

La prueba **T4** soportó una prueba de impacto a una altura de 2 metros aproximadamente. Presentó fractura mínima, rebotó amortiguando el golpe por su contenido de fibra interna, pero presentó alta absorción de agua. En la **Fig. 5.7** se pueden apreciar las pruebas las muestras de las pruebas **T1-T4**.



**Figura 5.7.** Muestras T1, T2, T3 y T4 de experimentación  
Fuente: propia, 2019

Con base a esta serie de pruebas se llegó al criterio de incluir en el proceso un aditivo de impermeabilización ajustando la proporción de fibra adecuada para que éstas también quedaran impermeabilizadas, para ello se planteó el uso del ácido poliláctico (PLA) Ingeo 2003D, tomando en cuenta los metaestados presentados por el PLA a diferentes temperaturas, como se observa en la **Fig. 5.8**. El rango de temperatura en el proceso de integración de las matrices biopoliméricas, la arcilla y la carga de fibra osciló entre 70-130 °C, en donde el biopolímero PLA, fue dúctil y a la vez correoso, lo que dio el tiempo suficiente para llevar a cabo el laminado por compresión, finalmente, el molde, junto con el laminado, fueron enfriados en agua, llevándose a cabo el desmolde.



**Figura 5.8.** Estados metaestables de PLAs semi cristalino  
Fuente: Koronis [58].

### **Análisis de Ciclo de Vida**

Con respecto al Análisis de Ciclo de vida. Los resultados muestran que la contribución relativa del biocompuesto sin impermeabilizante al indicador de Cambio Climático (GWP) es de 5,03 Kg CO<sub>2</sub> /Kg, ver **Tabla 18**.

**Tabla 18**

Comparación de los principales indicadores de impacto ambiental.

Aislante	Depleción abiótica	Depleción de la capa de ozono	Acidificación (Kg SO <sub>2</sub> eq)	Eutrofización Kg PO <sub>4</sub> ----eq	GWP(KgCO <sub>2</sub> / Kg)	Oxidación fotoquímica Kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq	Autor
Biocompuesto (Sin PLA)	1,13E-5	5,08 E-7	0,023	0,00777	5,03	0,00102	Arellano (2019)
Lana de roca	4.89E - 2	3.06E- 07	0.0292	4.4E- 03	5,36	2E - 03	Rivero, (2016), Roland
Lana de vidrio	0,47437	1.0859 E- 07	6,073164	1.4E -03	2,15	0,423432	Jiménez (2017), Rivero (2016),ISOVER

Fuente: Arellano, 2019, Rivero, 2016, Jiménez, 2017.

Tres formulaciones, se tomaron en cuenta para poder llevar a cabo la disertación. En la primera de ellas como se indica en la **Tabla 18** no se consideró el PLA como componente, cuyo valor GWP es comparable con los aislantes térmicos de lana de roca y lana de vidrio, pero los resultados de alta absorción de agua en esta formulación, hicieron que se tomara el criterio de utilizar otras dos formulaciones en donde si se consideró la adición de PLA en un 70% y 25% respectivamente, para disminuir la permeabilidad del biocompuesto al agua.

Durante la experimentación se observó que valores por debajo del 25 % de PLA afectan considerablemente las propiedades del biocompuesto, esta última optimización fue la que se consideró como propuesta final del biocompuesto de aplicación como material aislante térmico, no obstante, se abrió un abanico de posibilidades de aplicación correspondiente a otras áreas de aplicación, como el área automotriz, mobiliario y accesorios de jardinería.

Con respecto a el análisis comparativo del biocompuesto se obtuvo un resultado GWP en la formulación con 70 % de PLA de 15.8 Kg CO<sub>2</sub> eq. Ver **Tabla 19**. En el caso de la proporción 25 % de PLA se obtuvo un valor de GWP de 9.06 Kg CO<sub>2</sub> eq, muy cercano al GWP del poliestireno expandido. Cabe mencionarse que la discrepancia entre ambos valores, se dio por los espesores considerados en el primer caso de 25.4 mm y para el segundo caso de 4 mm.

**Tabla 19**

Análisis comparativo del ciclo de vida (LCA) de materiales de aislamiento térmico, CTGR significa de la cuna a la tumba, CTGA significa de la cuna a la puerta.

Material	Unidad funcional peso (Kg o m <sup>2</sup> )	Conductividad térmica (W/m <sup>2</sup> K)	Consumo de energía (MJeq por unidad funcional)	Cambio climático GWP (Kg de CO <sub>2</sub> eq por unidad funcional)	Enfoque y límite del sistema	Referencia
Biocompuesto PIÑA/PLA25%	1m <sup>2</sup> 4 mm espesor	0.048	109	15.8	CTGA, Italia	Arellano, 2019
PET reciclado	1.065	0.0355	83.723	1.783	CTGA, Italia	Intini & Kühtz. 2011
PET reciclado (comercializado)	1.48	0.037	21.056	3.117	CTGR, NA	<a href="http://www.maiano.it/">http://www.maiano.it/</a> b
Textil reciclado (comercializado)	1.79	0.0358	17.57	1.545	CTGR, NA	<a href="http://www.maiano.it/">http://www.maiano.it/</a> b
Textil y papel reciclados	14.7	0.034-0.039	267.7	14.68	CTGA, Italia	Ricciardi, <i>et al</i> , 2014
Poliestireno expandido extruído	1.75	0.035	127.31	13.22	CTGA, Europa	Asdrubali, 2009, 2006 a
Kenaf	1.52	0.038	59.37	3.17	CTGA, Italia (400 Km)	Ardente, <i>et al</i> , 2008
Lana de roca	1.2	0.04	53.09	2.77	CTGA, Europa	Asdrubali, 2009, 2006 a
Lana de oveja	0.76	0.038	17.119	1.457	CTGR, NA	<a href="http://www.maiano.it/">http://www.maiano.it/</a> b

NA: No disponible

a: información actualizada a través de SIMAPRO

b: Los datos originales se refieren a 1 kg de producto y no de unidad funcional, Además no se consideró la fase de uso.

Fuente: Modificada de [46].

## CONCLUSIONES

Al considerar el impacto del biocompuesto, existe una ligera diferencia en las emisiones GWP con respecto a los aislantes convencionales, es decir, tiene menor energía incorporada en relación con EPS, aunque su GWP es mayor en una unidad. Este último indicador puede mejorarse si se considera una arcilla local como la referida por Ramos [56]. El uso de materiales alternativos de origen natural como las fibras vegetales hace que los procesos sean más eficientes con respecto a la disminución del uso energético, sin embargo, en el caso del biocompuesto con PLA 25%, la estrategia es reemplazar uno de los componentes como la arcilla de bolas con una arcilla de origen local para disminuir el indicador en cuestión. Como es un biocompuesto híbrido (contiene una parte natural y otra parte de aditivos) sus resultados son más cercanos a los presentados por los aislantes convencionales, por esta razón los resultados en términos de conductividad térmica y energía incorporada son comparables con EPS.

Con base a los resultados obtenidos, se puede concluir que:

- El biocompuesto obtenido puede equipararse con PP y HDPE en resistencia mecánica a la tracción y módulo de elasticidad.
- Se cree que las propiedades térmicas y mecánicas del biocompuesto son aceptables en comparación con materiales reciclados.
- El uso de la cáscara de piña en el compuesto proporciona ciertos beneficios: bajos costos y bajo impacto ambiental.
- La inclusión del subproducto en el proceso representa una innovación en prácticas sostenibles.
- Los criterios estratégicos de uso de poli (ácido láctico) PLA proporcionaron mejores propiedades en términos de resistencia mecánica y mejor barrera a la humedad.
- Las observaciones microscópicas revelan, que la textura de cáscara molida, favorece la unión de la matriz y la carga.
- Por lo tanto, es factible utilizar el biocompuesto como aislante térmico ó como material de recubrimiento.

- Al volver a calcular el uso de otras arcillas como sustituto de la arcilla Old Mind, el uso de arcilla local es comparable teniendo en cuenta que contiene los mismos rangos de efectividad y al recalcular distancias, se obtiene un GWP más bajo.

## PROSPECTIVA

Además de la cáscara, la piña tiene otros subproductos, como la corona, que también podrían usarse. En este sentido, también se pueden explorar otros residuos lignocelulósicos similares en composición provenientes de las cáscaras de otros frutos. Derivado de las múltiples formulaciones obtenidas, se abrió una gama de posibilidades para el biocompuesto en otras áreas de aplicación como la automotriz, mobiliaria, jardinería, entre otras.

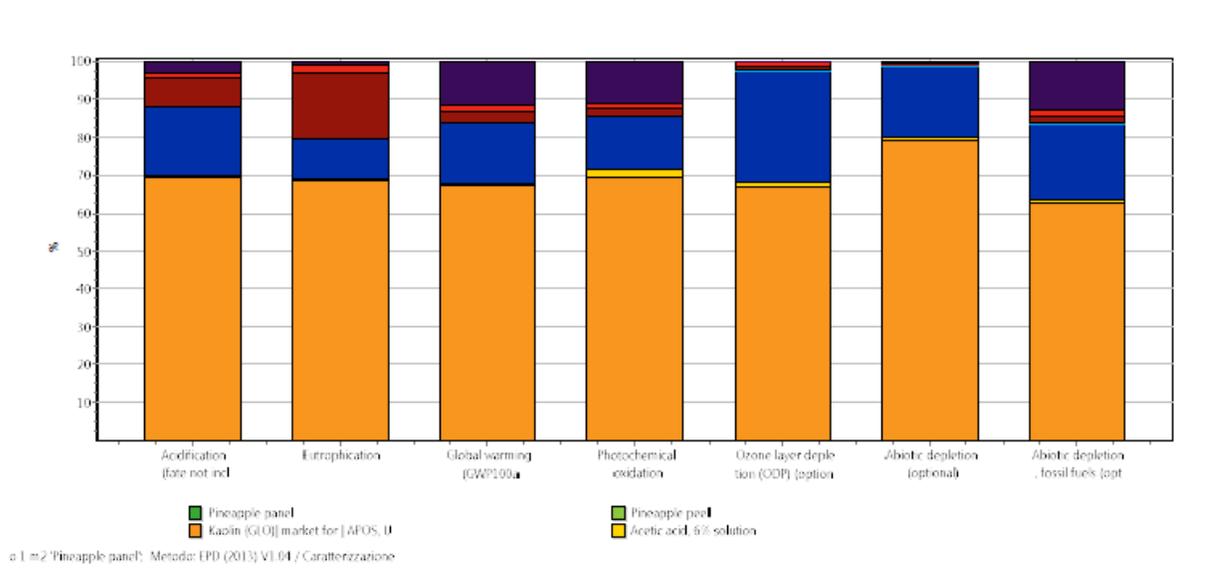
## ANEXOS

SimaPro 8.5.2.0 Educational  
Progetto: Insulation Pineapple Panel

Valutazione dell'impatto

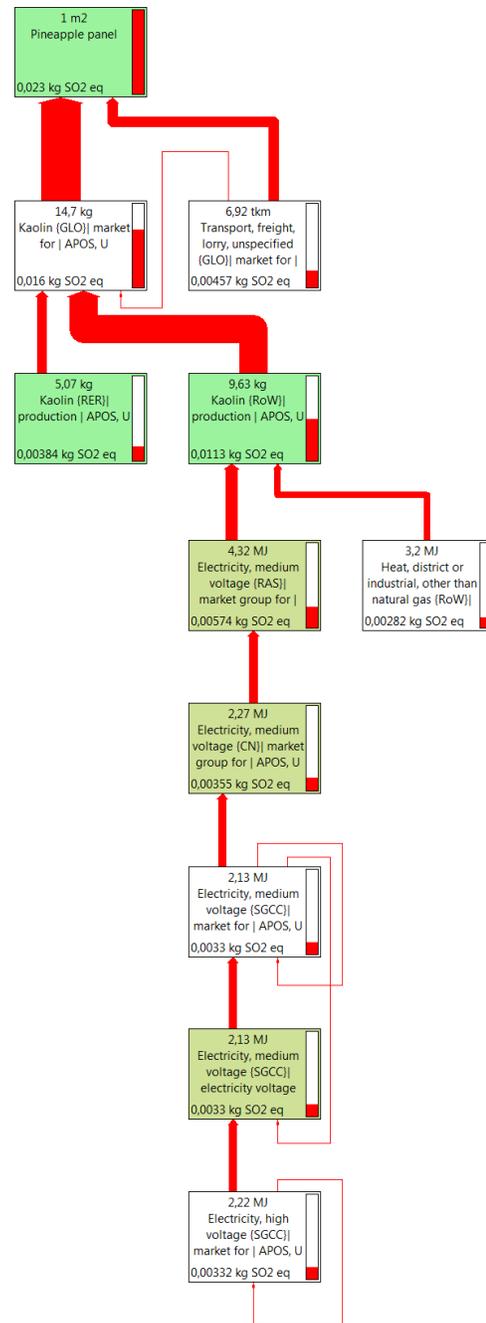
Data: 05/02/2019 Ora: 16:21:58

Calculation:	Analizza
Results:	Valutazione dell'impatto
Product:	1 m2 Pineapple panel (of project Insulation Pineapple Panel)
Metodo:	EPD (2013) V1.04
Indicatore:	Caratterizzazione
Unità:	%
Skip categories:	Mai
Esclude processi di infrastrutture:	No
Esclude le emissioni di lungo termine:	No
Modo relativo:	Orizzontale
Sorted on item:	Categoria d'impatto
Sort order:	Ascendente



**Gráfica 9.** Valoración del impacto para 1m<sup>2</sup> de panel de piña

Fuente: Arellano, (2019), a través del equipo de investigación de la Dra. Adriana Del Borghi (Departamento de Ingeniería Civil Química y Ambiental (DICCA) de la Escuela Politécnica de la Universidad de Génova Italia).



**Figura 5.9.** Categoría de impacto ambiental del biocompuesto con respecto a la acidificación expresada en Kg de SO<sub>2</sub> eq.

Fuente: Arellano, (2019), a través del equipo de investigación de la Dra. Adriana Del Borghi (Departamento de Ingeniería Civil Química y Ambiental (DICCA) de la Escuela Politécnica de la Universidad de Génova Italia).

### PRACTICA GRADOS BRIX

Procedimiento:

Inicialmente se debe calibrar el refractómetro con agua destilada a 20°C. Coloque unas gotas en el prisma del refractómetro y este debe quedar en cero. Seque el prisma con una toalla absorbente y realice el proceso con el jugo obtenido de una fruta.

Toma de datos por triplicado y sacar el promedio

**Tabla 20**

Porcentaje de azúcares en matriz biopolimérica de cáscara de piña concentrada y sin concentrar.

<b>Componente</b>	<b>Índice de refracción (n)</b>	<b>% °Brix = % azúcares</b>
Agua destilada	1.333	0
Matriz biopolimérica (sin concentrar)	1.3391	4.2
Matriz biopolimérica (concentrada)	1.354	14

Fuente: Propia, Laboratorio de Ingeniería Química de la UAEM, 2018.



## Ingeo™ Biopolymer 2003D Technical Data Sheet

### For Fresh Food Packaging and Food Serviceware

Ingeo biopolymer 2003D, a NatureWorks LLC product, is a thermoplastic resin derived from annually renewable resources and is specifically designed for use in fresh food packaging and food serviceware applications. Ingeo biopolymer 2003D is a transparent general purpose extrusion grade that is used naturally or as part of a formulated blend. This is a high molecular weight biopolymer grade that processes easily on conventional extrusion equipment. Extruded roll stock is readily thermoformable. See table at right for properties.

Typical Material & Application Properties <sup>(1)</sup>		
Physical Properties	Ingeo 2003D	ASTM Method
Specific Gravity	1.24	D792
MFR, g/10 min (210°C, 2.16kg)	6	D1238
Clarity	Transparent	
Mechanical Properties		
Tensile Strength @ Break, psi (MPa)	7,700 (53)	D882
Tensile Yield Strength, psi (MPa)	8,700 (60)	D882
Tensile Modulus, kpsi (GPa)	500 (3.5)	D882
Tensile Elongation, %	6.0	D882
Notched Izod Impact, ft-lb/in (J/m)	0.3 (16)	D256
Shrinkage is similar to PET <sup>(2)</sup>		
Heat Distortion Temperature (°C)	55	E2092

(1) Typical properties; not to be construed as specifications.

(2) Refer to Ingeo biopolymer Sheet Extrusion Processing Guide

#### Applications

Potential applications for Ingeo biopolymer 2003D include:

- Dairy containers
- Food serviceware
- Transparent food containers
- Hinged-ware
- Cold drink cups

#### Processing Information

Ingeo biopolymer 2003D is easily processed on conventional extrusion equipment. The material is stable in the molten state, provided that the drying procedures are followed. More detailed recommendations and processing requirements are found in the Ingeo biopolymer sheet extrusion processing guide, the purging technical data sheet, and the drying and crystallizing processing guide, all of which can be found at [www.natureworkslc.com](http://www.natureworkslc.com).

#### Machine Configuration

Ingeo biopolymer 2003D will process on conventional extrusion machinery with the following equipment: General purpose screw with L/D ratios from 24:1 to 32:1 and compression ratio of 2.5:1 to 3:1. Smooth barrels are recommended.

#### Process Details

##### Startup and Shutdown

Ingeo biopolymer 2003D is not compatible with a wide variety of commodity resins, and special purging sequences should be followed:

Processing Temperature Profile <sup>(1)</sup>		
Melt Temperature	410°F	210°C
Feed Throat	113°F	45°C
Feed Temperature	355°F	180°C
Compression Section	375°F	190°C
Metering Section	390°F	200°C
Adapter	390°F	200°C
Die	375°F	190°C
Screw Speed	20-100 rpm	

(1) These are starting points and may need to be optimized.

1. Clean extruder and bring temperatures to steady state with low viscosity, general purpose polystyrene or polypropylene.
2. Vacuum out hopper system to avoid contamination.
3. Introduce Ingeo biopolymers into the extruder at the operating conditions used in Step 1.
4. Once Ingeo biopolymer has purged, reduce barrel temperatures to desired set points.
5. At shutdown, purge machine with high viscosity polystyrene or polypropylene.

#### Drying

In-line drying may be required. A moisture content of less than 0.025% (250 ppm) is recommended to prevent viscosity degradation. Typical drying conditions for crystallized granules are 2 hours at 195°F (90°C) or to a dew point of -40°F (-40°C), airflow rate of greater than 0.5 cfm/lbs per hour

## ***Ingeo Biopolymer 2003D Technical Data Sheet***

of resin throughput. The resin should not be exposed to atmospheric conditions after drying. Keep the package sealed until ready to use and promptly reseal any unused material. Pellets that have been exposed to the atmosphere for extended time periods will require additional drying time. Amorphous regrind must be crystallized prior to drying, to assure efficient and effective drying.

### **Food Packaging Status**

---

#### **U.S. Status**

On January 3, 2002 FCN 000178 submitted by NatureWorks LLC to FDA became effective. This effective notification is part of list currently maintained on FDA's website at

<http://www.fda.gov/food/ingredientspackaginglabeling/packagingfcs/notifications/default.htm>

This grade of Ingeo biopolymer may therefore be used in food packaging materials and, as such, is a permitted component of such materials pursuant to section 201(s) of the Federal, Drug, and Cosmetic Act, and Parts 182, 184, and 186 of the Food Additive Regulations. All additives and adjuncts contained in the referenced Ingeo biopolymer formulation meet the applicable sections of the Federal Food, Drug, and Cosmetic Act. The finished polymer is approved for all food types and B-H use conditions. We urge all of our customers to perform GMP (Good Manufacturing Procedures) when constructing a package so that it is suitable for the end use.

#### **European Status**

This grade of Ingeo biopolymer complies with Plastics Regulation 10/2011 as amended. No SML's for the above referenced grade exist in Plastics Regulation 10/2011 as amended. NatureWorks LLC would like to draw your attention to the fact that the EU- Plastics Regulation 10/2011, which applies to all EU-Member States, includes a limit of 10 mg/dm<sup>2</sup> of the overall migration from finished plastic articles into food. In accordance with Plastics Regulation 10/2011 the migration should be measured on finished articles placed into contact with the foodstuff or appropriate food simulants for a period and at a temperature which are chosen by reference to the contact conditions in actual use, according to the rules laid down in Plastics Regulation 10/2011.

Please note that it is the responsibility of both the manufacturers of finished food contact articles as well as the industrial food packers to make sure that these articles in their actual use are in compliance with the imposed specific and overall migration requirements.

This grade as supplied meets European Parliament and Council Directive 94/62/EC of 20 December 1994 on

## **Safety and Handling Considerations**

Safety Data Sheets (SDS) for Ingeo biopolymers are available from NatureWorks. SDS's are provided to help customers satisfy their own handling, safety, and disposal needs, and those that may be required by locally applicable health and safety regulations. SDS's are updated regularly; therefore, please request and review the most current SDS's before handling or using any product.

*The following comments apply only to Ingeo biopolymers; additives and processing aids used in fabrication and other materials used in finishing steps have their own safe-use profile and must be investigated separately.*

## **Hazards and Handling Precautions**

Ingeo biopolymers have a very low degree of toxicity and, under normal conditions of use, should pose no unusual problems from incidental ingestion or eye and skin contact. However, caution is advised when handling, storing, using, or disposing of these resins, and good housekeeping and controlling of dusts are necessary for safe handling of product. Pellets or beads may present a slipping hazard.

No other precautions other than clean, body-covering clothing should be needed for handling Ingeo biopolymers. Use gloves with insulation for thermal protection when exposure to the melt is localized. Workers should be protected from the possibility of contact with molten resin during fabrication.

Handling and fabrication of resins can result in the generation of vapors and dusts that may cause irritation to eyes and the upper respiratory tract. In dusty atmospheres, use an approved dust respirator.

Good general ventilation of the polymer processing area is recommended. At temperatures exceeding the polymer melt temperature (typically 175°C), polymer can release fumes, which may contain fragments of the polymer, creating a potential to irritate eyes and mucous membranes. Good general ventilation should be sufficient for most conditions. Local exhaust ventilation is recommended for melt operations. Use safety glasses (or goggles) to prevent exposure to particles, which could cause mechanical injury to the eye. If vapor exposure causes eye discomfort, improve localized fume exhausting methods or use a full- face respirator.

The primary thermal decomposition product of PLA is acetaldehyde, a material also produced during the thermal degradation of PET. Thermal decomposition products also include carbon monoxide and hexanal, all of which exist as gases at normal room conditions. These species are highly flammable, easily ignited by spark or flame, and can also

appropriate steps to protect the environment and the health of our employees and the public.

### **Customer Notice**

---

NatureWorks encourages its customers and potential users of its products to review their applications from the

standpoint of human health and environmental quality. To help ensure our products are not used in ways for which they were not intended or tested, our personnel will assist customers in dealing with ecological and product safety considerations. Your sales representative can arrange the proper contacts. NatureWorks literature should be consulted prior to the use of the company's products.

### **NOTICE:**

No freedom from infringement of any patent owned by NatureWorks LLC or others is to be inferred. No information in this publication can be considered a suggestion to infringe patents.

The technical information, recommendations and other statements contained in this document are based upon tests or experience that NatureWorks believes are reliable, but the accuracy or completeness of such information is not guaranteed. Many factors beyond NatureWorks control can affect the use and performance of a NatureWorks product in a particular application, including the conditions under which the product is used and the time and environmental conditions in which the product is expected to perform. Since these factors are uniquely within the user's knowledge or control, it is essential that the user evaluate the NatureWorks product to determine whether it is fit for a particular purpose and suitable for the user's method of application. In addition, because use conditions are outside of NatureWorks control and applicable laws may differ from one location to another and may change with time, Customer is solely responsible for determining whether products and the information in this document are appropriate for Customer's use and for ensuring that Customer's workplace, use and disposal practices are in compliance with applicable laws and regulations. NatureWorks LLC assumes no obligation or liability for the information in this document.

NATUREWORKS MAKES NO WARRANTY, EXPRESS OR IMPLIED, REGARDING THE INFORMATION CONTAINED HEREIN OR ITS PRODUCTS, INCLUDING BUT NOT LIMITED TO ANY WARRANTY AS TO ACCURACY OR COMPLETENESS OF INFORMATION, OR ANY IMPLIED WARRANTY OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE.

**NOTICE REGARDING PROHIBITED USE RESTRICTIONS:** Unless specifically agreed to in writing by NatureWorks, NatureWorks LLC will not knowingly sell or sample any product into any of the following commercial or developmental applications (i) components of or packaging for tobacco products, (ii) components of products intended for human or animal consumption, (iii) any application that is intended for any internal contact with human body fluids or body tissues, (iv) as a critical component in any medical device that supports or sustains human life, (v) in any product that is designed specifically for ingestion or internal use by pregnant women, (vi) in any application designed specifically to promote or interfere with human reproduction, (vii) in microbeads, including those used in personal care/cosmetic applications, or (viii) to manufacture bottles or bottle pre-forms in North America.

For additional information please contact NatureWorks via our [website](#) on the tab called [FAQ's](#) or by clicking [here](#).



15305 Minnetonka Blvd., Minnetonka, MN 55345

## REFERENCIAS

- [1] Cecil Balmond, A. B. Larena, and R. Aroca Hernández-Ros, "Estrategias de diseño estructural en la arquitectura contemporánea," p. 476, 2007.
- [2] C. Du Plessis, "A strategic framework for sustainable construction in developing countries," *Constr. Manag. Econ.*, vol. 25, no. 1, pp. 67–76, 2007, doi: 10.1080/01446190600601313.
- [3] A. Ticoalu, T. Aravinthan, and F. Cardona, "A review of current development in natural fiber composites for structural and infrastructure applications," *South. Reg. Eng. Conf. 2010, SREC 2010 - Inc. 17th Annu. Int. Conf. Mechatronics Mach. Vis. Pract. M2VIP 2010*, no. November, pp. 113–117, 2010.
- [4] T. Majewski and A. Błędzki, "Desarrollo y aplicaciones actuales de los plásticos reforzados por fibras naturales," *Memorias Del Xix Congr. Int. Anu. La Somim*, pp. 676–682, 2013.
- [5] J. Góngora, "La industria del plástico en México y el mundo," *Comer. Exter.*, vol. 64, no. 5, pp. 6–9, 2014.
- [6] M. Conde, "Presente Futuro de la Industria del Plástico en México Contenido," p. <http://www.ptq.pemex.gob.mx/productosyservicios/ev>, 2012.
- [7] E. T. H. Vink, K. R. Rábago, D. A. Glassner, and P. R. Gruber, "Applications of life cycle assessment to NatureWorks™ polylactide (PLA) production," *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 80, no. 3, pp. 403–419, 2003, doi: 10.1016/S0141-3910(02)00372-5.
- [8] M. A. P. Mercader, M. Olivares, and A. Ramírez de Arellano, "Modelo de cuantificación del consumo energético en edificación," *Mater. Constr.*, vol. 62, no. 308, pp. 567–582, 2012, doi: 10.3989/mc.2012.02411.

- [9] A. Le Duigou, J. M. Deux, P. Davies, and C. Baley, "PLLA/flax mat/balsa bio-sandwich-environmental impact and simplified life cycle analysis," *Appl. Compos. Mater.*, vol. 19, no. 3–4, pp. 363–378, 2012, doi: 10.1007/s10443-011-9201-3.
- [10] C. Material and D. E. R. En, "UTILIZACIÓN DE LAS FIBRAS DEL RASTROJO DE PIÑA ( Ananas," vol. 6, no. 2, pp. 157–179, 2005.
- [11] G. Quijandría, J. Berrocal, and L. Pratt, "La Industria de la Piña en Costa Rica Análisis de Sostenibilidad," ... *para la Sostenibilidad y el Desarro. ...*, no. July 1997, p. 27, 1997, doi: 10.13140/RG.2.1.1024.0082.
- [12] A. Choonut, M. Saejong, and K. Sangkharak, "The production of ethanol and hydrogen from pineapple peel by *Saccharomyces cerevisiae* and *Enterobacter aerogenes*," *Energy Procedia*, vol. 52, pp. 242–249, 2014, doi: 10.1016/j.egypro.2014.07.075.
- [13] A. C. Decheco Egúsquiza, "Aprovechamiento de residuos de Ananas Comosus (Piña) para la producción de etanol por vía fermentativa de *Saccharomyces cerevisiae*," pp. 4–103, 2016.
- [14] F. Para, L. A. Reutilización, and T. Y. D. D. E. Desechos, "Consultor José Emil de la rocha valverde," 2015.
- [15] Ticso, "Produccion De Piña ( Ananas Comosus ) Para Municipio De," *Tecnol. la Inf. y las Comun. la Orinoquia* |, pp. 10–133, 2014.
- [16] S. Rasgado, M. Trejo, and P. Bustamante, "Extracción de fibra en residuos agroindustriales de piña para su aplicación en alimentos funcionales.," *Investig. y Desarro. en Cienc. y Tecnol. Aliment.*, vol. 1, no. 1, pp. 448–453, 2016.

- [17] J. Knippers and T. Speck, "Design and construction principles in nature and architecture," *Bioinspiration and Biomimetics*, vol. 7, no. 1, 2012, doi: 10.1088/1748-3182/7/1/015002.
- [18] M. Drahansky *et al.*, "We are IntechOpen , the world ' s leading publisher of Open Access books Built by scientists , for scientists TOP 1 %," *Intech*, vol. i, no. tourism, p. 13, 2016, doi: <http://dx.doi.org/10.5772/57353>.
- [19] F. Vilaplana, E. Strömberg, and S. Karlsson, "Environmental and resource aspects of sustainable biocomposites," *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 95, no. 11, pp. 2147–2161, 2010, doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2010.07.016.
- [20] A. K. Mohanty, M. Misra, and L. T. Drzal, "Sustainable Bio-Composites from renewable resources: Opportunities and challenges in the green materials world," *J. Polym. Environ.*, vol. 10, no. 1–2, pp. 19–26, 2002, doi: 10.1023/A:1021013921916.
- [21] M. Van Den Oever, K. Molenveld, M. Van Der Zee, and H. Bos, *Bio-based and biodegradable plastics – Facts and Figures*, no. 1722.
- [22] S. Ponce and V. Guerrero, "Propiedades Mecánicas De Compuestos Biodegradables Elaborados a Base De Ácido Poliláctico Reforzados Con Fibras De Abacá," *Rev. Epn*, vol. 33, no. 2, 2014.
- [23] L. Yu, K. Dean, and L. Li, "Polymer blends and composites from renewable resources," *Prog. Polym. Sci.*, vol. 31, no. 6, pp. 576–602, 2006, doi: 10.1016/j.progpolymsci.2006.03.002.
- [24] E. Petinakis, L. Yu, and G. Simon, "Natural Fibre Bio-Composites Incorporating Poly ( Lactic Acid )," 2013.
- [25] "Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223120659007>," 2005.

- [26] K. Oksman, M. Skrifvars, and J. F. Selin, "Natural fibres as reinforcement in polylactic acid (PLA) composites," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 63, no. 9, pp. 1317–1324, 2003, doi: 10.1016/S0266-3538(03)00103-9.
- [27] B. Zunic and S. Peter, "World ' s largest Science , Technology & Medicine Open Access book publisher," no. 2016, pp. 267–322, 2018.
- [28] European Bioplastics, "Fact sheet: What are bioplastics?," p. 4, 2016.
- [29] M. C. McCann and N. C. Carpita, "Designing the deconstruction of plant cell walls," *Curr. Opin. Plant Biol.*, vol. 11, no. 3, pp. 314–320, 2008, doi: 10.1016/j.pbi.2008.04.001.
- [30] I. Chang, M. Jeon, and G. C. Cho, "Application of microbial biopolymers as an alternative construction binder for earth buildings in underdeveloped countries," *Int. J. Polym. Sci.*, vol. 2015, 2015, doi: 10.1155/2015/326745.
- [31] M. F. Ashby and Y. J. M. Bréchet, "Designing hybrid materials," *Acta Mater.*, vol. 51, no. 19, pp. 5801–5821, 2003, doi: 10.1016/S1359-6454(03)00441-5.
- [32] M. Olivares Santiago, C. Galán Marín, and J. Roa Fernández, "Los composites. Características y aplicaciones en la edificación," *Inf. la Construcción*, vol. 54, no. 484, pp. 45–62, 2003, doi: 10.3989/ic.2003.v54.i484.568.
- [33] A. Mustapha, "Agricultural Biomass Raw Materials : The Current State and Future Agricultural Biomass Raw Materials :," no. August, 2014, doi: 10.1007/978-3-319-07641-6.
- [34] G. M. Thun, "Responsive Building Envelopes : Characteristics and Evolving Paradigms," no. October 2012, 2014.

- [35] D. M. Addington and D. L. Schodek, "Smart Materials and New Technologies."
- [36] "PLANT FIBERS REINFORCED POLY ( LACTIC ACID ) ( PLA ) AS A GREEN COMPOSITES : REVIEW," no. March, 2016.
- [37] K. R. Hakeem, M. Jawaid, and U. Rashid, *Biomass and bioenergy: Processing and properties*, vol. 9783319076, no. July 2016. 2014.
- [38] O. Faruk, A. K. Bledzki, H. P. Fink, and M. Sain, "Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000-2010," *Prog. Polym. Sci.*, vol. 37, no. 11, pp. 1552–1596, 2012, doi: 10.1016/j.progpolymsci.2012.04.003.
- [39] A. Llerena Encalada, "Estudio de compuestos cementíceos reforzados con fibras vegetales: Evaluación previa del comportamiento de un panel de cemento blanco con adición de meta-caolín reforzado con un textil no-tejido de fibras largas de lino y cáñamo," 2014, doi: <http://hdl.handle.net/2099.1/25365>.
- [40] K. Srinivas, A. Lakshumu Naidu, and M. V. A. Raju Bahubalendruni, "A review on chemical and mechanical properties of natural fiber reinforced polymer composites," *Int. J. Performability Eng.*, vol. 13, no. 2, pp. 189–200, 2017, doi: 10.23940/ijpe.17.02.p8.189200.
- [41] *tosatc & Donalc 2. .*
- [42] N. Graupner, A. S. Herrmann, and J. Müssig, "Natural and man-made cellulose fibre-reinforced poly(lactic acid) (PLA) composites: An overview about mechanical characteristics and application areas," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 40, no. 6–7, pp. 810–821, 2009, doi: 10.1016/j.compositesa.2009.04.003.
- [43] "Evolución de materiales sustentables y ecotecnologías y recomendaciones para la implementación masiva de la NAMA de Vivienda Sustentable de México."

- [44] C. O. N. Adhesivo, F. Formaldehido, and I. Environme, "INTEGRATED ENVIRONMENTAL DESIGN AND ECO-DESIGN IN THE," no. December 2010, 2015.
- [45] W. Wang, M. Sain, and P. A. Cooper, "Study of moisture absorption in natural fiber plastic composites," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 66, no. 3–4, pp. 379–386, 2006, doi: 10.1016/j.compscitech.2005.07.027.
- [46] F. Asdrubali, F. D'Alessandro, and S. Schiavoni, "A review of unconventional sustainable building insulation materials," *Sustain. Mater. Technol.*, vol. 4, no. 2015, pp. 1–17, 2015, doi: 10.1016/j.susmat.2015.05.002.
- [47] X. Petit-breuilh, C. J. Whitman, C. Lagos, G. A. P, and L. N. S. P, "Natural Fibre Insulation in Rural Southern Chile," *PLEA 2013 Sustain. Archit. a Renew. Futur.*, no. September, 2013.
- [48] R. Muthuraj , "Aplicattions of polysaccharide and protein based aerogels in thermal insulation " *Chapter in RSC Green Chemistry* · August 2018.
- [49] J. Oliver, 濟無 *No Title No Title*, vol. 53, no. 9. 2013.
- [50] H. A. López-Aguilar, E. A. Huerta-Reynoso, J. A. Gómez, J. M. Olivarez-Ramírez, A. Duarte-Moller, and A. Pérez-Hernández, "Life cycle assessment of regional brick manufactur," *Mater. Constr.*, vol. 66, no. 322, pp. 1–9, 2016, doi: 10.3989/mc.2016.02315.
- [51] M. K. Dixit, J. L. Fernández-solís, S. Lavy, and C. H. Culp, "Identification of parameters for embodied energy measurement : A literature review," vol. 42, pp. 1238–1247, 2010, doi: 10.1016/j.enbuild.2010.02.016.
- [52] N. Impact, C. Tool, B. On, and L. Cycle, "Enviromental impact comparative tool based on life cycle assesment Herramienta comparativa de impacto ambiental

- basada en método de análisis de ciclo de vida,” 2017.
- [53] Y. I. Alamin, M. Castilla, J. D. Álvarez, and A. Ruano, “An Economic Model-Based Predictive Control to Manage the Users’ Thermal Comfort in a Building,” pp. 1–18, doi: 10.3390/en10030321.
- [54] D. Acosta, “Arquitectura y construcción sostenibles: Conceptos, Problemas Y Estrategias,” *Dearq*, no. 4, pp. 14–23, 2009, doi: 10.18389/dearq4.2009.02.
- [55] A. E. Karlsson, “Department of Biological and Environmental Sciences Climate Impact From Fresh Fruit,” 2017.
- [56] E. Ramos Ramírez, J. J. Guzmán Andrade, M. C. Sandoval Juárez, and Y. Gallaga Ortega, “Caracterización de Arcillas del Estado de Guanajuato y su Potencial Aplicación en Cerámica,” *Acta Univ.*, vol. 12, no. 1, pp. 23–30, 2002, doi: 10.15174/au.2002.287.
- [57] J. K. Sueker, “Comment on ‘Elevated tungsten and cobalt in airborne particulates in Fallon, Nevada: Possible implications for the childhood leukemia cluster’ by P.R. Sheppard, G. Ridenour, R.J. Speakman and M.L. Witten,” *Appl. Geochemistry*, vol. 21, no. 6, pp. 1083–1085, 2006, doi: 10.1016/j.apgeochem.2006.04.002.
- [58] G. Koronis, A. Silva, “Green composites for automotive applications,” *Composites Science and Engineering*. Singapore, Woodhead Publishing, 2019.
- [59] S. Hernández, J.A. Hernández, B.G. Alcaraz, *PLANEACIÓN INTELIGENTE DE CIUDADES*, Toluca, México, Eón, 2018.
- [60] D.A. Arellano, “Metodología para el desarrollo de materiales constructivos de bajo impacto ambiental en México,” Tesis, Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, México, 2020.