



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Posgrado en Diseño Industrial
Maestría en Diseño Industrial
Campo de conocimiento: Tecnología

MATERIALES BIOCOMPUESTOS PARA EL DISEÑO ECOLÓGICO

Caso de Estudio: Fibras de Bagazo de *Agave tequilana*
como Agente de Refuerzo para el Biopolímero PLA

Tesis que para optar por el grado de Maestro en Diseño Industrial
Presenta:

Leonardo Echeverría Arjonilla

Comité Tutor

M.D.I. Brenda García Parra – Posgrado en Diseño Industrial

M.D.I. Ana María Losada Alfaro – Posgrado en Diseño Industrial

Dr. Miguel Eguiluz Senior – Posgrado en Diseño Industrial

México D.F. Noviembre 2013



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Directores de tesis

M. Brenda García Parra

M. Ana María Losada Alfaro

Dr. Miguel Eguiluz Senior

Asesor externo

Dr. Gonzalo Canché Escamilla

Unidad de Materiales, Centro de Investigación Científica de Yucatán

Sinodales

M. Ángel Grosó Sandoval

M. Alejandro Rodea Chávez

Agradecimientos

A mis abuelos por sus raíces. A mis padres Yolanda y Carlos, a quienes admiro y les agradezco la increíble oportunidad de vivir.

A mi hermano Carlos, con quien aprendí que cuestionar es la esencia del diseño, primero se manifestó como construir y desarmar cualquier cosa que tuviera tornillos, para convertirse en una forma de pensar y percibir el mundo.

A Cassandra, me siento afortunado de considerarte mi compañera de vida, crecer y madurar a tu lado me inspira. Gracias por tu cariño y apoyo incondicional, te quiero y te admiro con todo mi ser.

A la Universidad Nacional Autónoma de México y al Consejo Nacional de Investigación y Tecnología, por la oportunidad de cursar estos estudios y el apoyo otorgado para llevar a cabo esta investigación.

A mis tutores quienes siempre mostraron un interés genuino por apoyar esta investigación y aportaron conocimientos que ayudaron a orientar mis objetivos.

Al Posgrado en Diseño Industrial de la UNAM y el arduo trabajo de las personas que hacen posible su funcionamiento.

A los Proyectos de Apoyo a Estudios de Posgrado (PAEP) por el apoyo recibido que permitió realizar la experimentación a nivel industrial, como parte del proyecto Estrategias de Ecodiseño, Desarrollo de Productos Ambientalmente Responsables.

Al Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY) por abrirme las puertas para realizar la estancia experimental que hizo posible la elaboración y análisis del material biocompuesto. Con especial mención a los integrantes de la Unidad de Materiales quienes me apoyaron y asesoraron.

Dr. Pedro Iván Gonzáles Chi.
Dr. Gonzalo Canché Escamilla.
Ing. Q. Santiago Duarte Aranda.

Al M. Carlos Vidal Cupul Manzano Jefe del Laboratorio de Procesamiento.
Al personal del Laboratorio de Procesamiento de la Unidad de Materiales del CICY.

Al M. Amando José Padilla Ramírez, del Departamento de Materiales en la Universidad Autónoma de México, Azcapotzalco.

Al Ing. Miguel Ángel Canseco Martínez del Instituto de Investigaciones en Materiales de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Se agradece a la empresa Plastilam S.A. de C.V. por su colaboración y disposición para la elaboración de la experimentación a nivel industrial, destacando al personal de Extrusión, Laminación y los integrantes del Taller de Carpintería Plástica.

En memoria del Jefe de Taller de Carpintería Plástica Martín Sánchez Aquino, por su amistad y trabajo profesional.

ÍNDICE

Resumen	11
Introducción.....	12

CAPÍTULO I

Sustentabilidad y La Problemática Material.....	14
del Desarrollo Humano	14
1.1 Diseño Ecológico	17
1.2 La problemática material y la construcción del ambiente artificial	19
La devaluación del capital natural	20
Dependencia por el desarrollo material	22
Flujos de Materiales.....	26
1.3 Desmaterialización	28
¿Por qué diseñar nuevos materiales y objetos?	30

CAPÍTULO II

Aprovechamiento de Residuos para el Desarrollo de Materiales	32
2.1 El ciclo de vida de los materiales.....	32
Materiales Sustentables.....	37
Ecomateriales	38
2.2 Los residuos como materia prima.....	43
Reciclaje	44
Materiales Recuperados	45
Residuos renovables.....	46
Los residuos agrícolas y agroindustriales en México	48
2.3 Residuos agroindustriales del Agave tequilana.....	49
El agave	49
Agave tequilana	49
Producción de bagazo	51
Consumo de agave	53
Procesamiento del bagazo.....	56
2.4 Materiales biocompuestos para el aprovechamiento del bagazo de agave.....	57
Materiales biocompuestos.....	57
Biocompuestos reforzados con fibras naturales.....	58
Resinas y adhesivos	60
Biopolímeros.....	61
Bioplásticos o alimentos.....	64
2.5 Reciclaje de residuos como estrategia de ciclo de vida.....	67

CAPÍTULO III

Caso de Estudio: Elaboración de un Material Biocompuesto para el Reciclaje de Residuos Agroindustriales del Agave tequilana 69

3.1 Materiales biocompuestos reforzados con fibras de agave..... 70

3.2 Materiales biocompuestos de poliácido láctico (PLA) y fibras naturales 71

3.3 Componentes del material biocompuesto 72

MATRIZ – Biopolímero PLA 72

Propiedades del PLA 73

Propiedades físicas..... 73

Propiedades mecánicas..... 74

Propiedades ópticas..... 74

Propiedades químicas..... 75

Propiedades de procesamiento..... 75

AGENTE DE REFUERZO – Fibra de bagazo de *Agave tequilana* 76

Propiedades de las Fibras..... 77

Propiedades Mecánicas..... 77

Propiedades Químicas..... 77

3.4 Elaboración y análisis del biocompuesto PLA/FAT 80

Estrategia Experimental 80

3.4.1 Materiales de experimentación 80

3.4.2 Procesamiento 81

3.4.3 Propiedades Mecánicas 84

Resistencia a la tensión 85

Resistencia a la flexión 89

Resistencia al impacto 91

3.4.4 Densidad..... 93

3.4.5 Propiedades Térmicas..... 94

DSC..... 95

TGA..... 97

3.4.6 Absorción de Agua..... 99

3.4.7. Resistencia en la intemperie..... 103

3.4.8 Biodegradación 106

3.5 Conclusiones de la experimentación..... 111

3.6 Experimentación a nivel industrial..... 117

3.6.1 Costo de la producción del biocompuesto PLA/FAT 123

CAPÍTULO IV

Recomendaciones durante el Ciclo de Vida del 126

Material Biocompuesto PLA/FAT 126

4.1 EXTRACCIÓN..... 128

Fibra de bagazo *Agave tequilana* 128

PLA Poliácido láctico..... 129

4.2 PRODUCCIÓN 131

4.3 MANUFACTURA 132

Criterios de Aplicación 134

4.4 DISTRIBUCIÓN..... 139

4.5 USO	141
4.6 DISPOSICIÓN FINAL.....	142
Conclusiones	146
Retos para el futuro.....	148
GLOSARIO	150
REFERENCIAS.....	153
ANEXOS	
Anexo 1. Compatibilidad entre Materiales.....	159
Anexo 2. Adhesivos Utilizados y sus Aplicaciones en Productos de Madera.....	161
Anexo 3. Efectos del Formaldehído	162
Anexo 4. Test de Análisis	163
Anexo 5. Clasificación de los Recursos Naturales	165
Anexo 6. Compostaje.....	166
Anexo 7. Residuos Sólidos Urbanos	169
Anexo 8. Intensidad Energética de los Materiales	172
Anexo 9. Producción de Tequila	173
Anexo 10. Clasificación General de las Fibras.....	174
Anexo 11. Fibras Naturales.....	175
Anexo 12. Propiedades de las Fibras Naturales	176
Anexo 13. Análisis de Ciclo de Vida	178
Anexo 14. Impactos Ambientales en el Ciclo de Vida del PLA.....	179

FIGURAS

Figura 1. Modelo de sustentabilidad.....	14
Figura 2. Esquema de tipos de capital.	21
Figura 3. Línea del tiempo de los materiales.	23
Figura 4. Consumo de materia prima en el mundo.	24
Figura 5. Producción anual de materiales industriales.	25
Figura 6. Flujo de materiales y energía en una economía	26
Figura 7. Ciclo de vida de los materiales.	32
Figura 8. Anatomía del agave.	50
Figura 9. Sembradío de <i>Agave tequilana</i> Weber variedad Azul.	50
Figura 10. Proceso de producción de tequila.....	51
Figura 11. Piñas de agave tequilero.....	52
Figura 12. Bagazo de la producción del tequila.	52
Figura 13. Usos comunes y potenciales del bagazo de agave.....	53
Figura 14. Consumo total de agave para Tequila y Tequila 100% de agave.	54
Figura 15. Antecedentes del desarrollo de materiales biocompuestos en el mundo, reciclado fibras naturales.	59
Figura 16. Capacidad mundial de producción de biopolímeros.....	64
Figura 17. Proyección de la capacidad mundial de bioplásticos hasta el 2020.....	65
Figura 18. Ciclo de vida de un material biocompuesto mediante el aprovechamiento de residuos.	68
Figura 19. Bagazo del procesamiento del henequén (<i>Agave fourcroydes</i>).....	70
Figura 20. Pellets de PLA grado extrusión.	73
Figura 21. Microscopía de las fibras de bagazo de agave tequilana.	76
Figura 22. Microscopía de fibras de bagazo de agave tequilana.....	76
Figura 23. Microscopía de una fibra de bagazo de agave tequilero.	79
Figura 24. Árbol de procesos para el procesamiento.....	81
Figura 26. Extrusión de lámina con dado plano.....	82
Figura 25. Mezclado de formulación.	82
Figura 27. Extrusor doble husillo utilizado para obtener la muestras para el análisis.....	83
Figura 28. Línea de procesamiento utilizando un extrusor monohusillo.	83
Figura 29. Resistencia a la tensión de las diferentes formulaciones de material compuesto.	86
Figura 30. Ensayo de resistencia a la tensión.	86
Figura 31. Módulo de elasticidad del material biocompuesto.....	87
Figura 32. Comparación de la resistencia a la tensión entre algunos materiales biocompuestos reforzados con fibras naturales.....	88
Figura 33. Ensayo de resistencia a la flexión.....	89
Figura 34. Resistencia a la flexión de diferentes formulaciones de material compuesto.....	90
Figura 35. Módulo de flexión de las diferentes formulaciones de material compuesto.....	90
Figura 36. Resistencia a impacto de las diferentes formulaciones.	92
Figura 37. Microfotografías de SEM de superficie de fractura al impacto de materiales biocompuestos PLA/FAT.	93
Figura 38. Termogramas de DSC de muestras de PLA virgen y extruido.....	96
Figura 39. DSC de materiales biocompuestos PLA/FAT y diferente contenido de fibras de <i>Agave tequilana</i>	96
Figura 40. Termograma del TGA de las fibras de bagazo de agave.	98
Figura 41. Temograma del TGA del PLA extruido.	98
Figura 42. TGA del PLA y diferentes muestras del biocompuesto PLA/FAT.	99

Figura 43.	Comparación de aumento de peso por la absorción de agua del biocompuesto PLA/FAT.	101
Figura 44.	Absorción de agua con el paso del tiempo.	102
Figura 45.	Deformación del biocompuesto con un contenido de fibra del 10%.	103
Figura 46.	Deformación del biocompuesto con un contenido de fibra del 20%.	103
Figura 47.	Deformación del biocompuesto con un contenido de fibra del 30%.	104
Figura 48.	Deformación del biocompuesto con un contenido de fibra del 40%.	104
Figura 49.	Decoloración por exposición a la luz UV.	105
Figura 50.	Preparación de la prueba de degradación 3 de Julio de 2012.	108
Figura 51.	Registro de la prueba el 13 de Septiembre de 2012.	109
Figura 52.	Muestras de Biocompuesto PLA/FAT después de pruebas de degradación.	109
Figura 53.	Muestra con un contenido del 40% de fibra después de dos meses de entierro.	110
Figura 54.	Láminas extruidas con diferente contenido de fibra.	111
Figura 55.	Molde de aluminio para pruebas de moldeo por compresión.	112
Figura 56.	Platos obtenidos mediante moldeo por compresión.	113
Figura 57.	Muestras obtenidas por moldeo por compresión.	113
Figura 58.	Diferentes formulaciones del material.	114
Figura 59.	Lámina ondulada con un contenido de fibra de 30%.	114
Figura 60.	Lámina troquelada.	115
Figura 61.	Hoja de Especificaciones del biocompuesto PLA/FAT 30.	116
Figura 62.	Árbol de procesos del procesamiento industrial.	118
Figura 63.	Extrusión del biocompuesto PLA/FAT.	119
Figura 64.	Muestras de perfil extruido composición 80/20 PLA/FAT.	120
Figura 65.	Perfiles obtenidos durante la experimentación.	120
Figura 66.	Comparación de color entre láminas del biocompuesto PLA/FAT.	121
Figura 67.	Marcas de acabado debido a la fricción del dado y el flujo de material.	121
Figura 68.	Sección de láminas de biocompuesto PLA/FAT con vetas de extrusión.	122
Figura 69.	Ciclo de vida del material biocompuesto PLA/FAT.	126
Figura 70.	Clasificación de productos en relación a cuatro factores del ciclo de vida.	135
Figura 71.	Producción de bioplásticos por aplicación para el 2016.	137
Figura 72.	Aplicaciones para materiales compuestos reforzados con fibras naturales.	138
Figura 73.	Recomendaciones para el manejo y distribución del biocompuesto PLA/FAT.	140
Figura 74.	Precauciones a tomar para el uso del biocompuesto PLA/FAT.	141
Figura 75.	Sistema de Identificación de Termoplásticos.	142
Figura 76.	Identificación de Termoplásticos.	160
Figura 77.	Clasificación de los recursos naturales.	165
Figura 78.	Composición de los residuos sólidos urbanos en el 2008	171
Figura 79.	Reciclaje de RSU por Composición 2008	171
Figura 80.	Producción de Tequila.	173
Figura 81.	Clasificación general de las fibras.	174
Figura 82.	Clasificación de las fibras naturales.	175
Figura 83.	Contribuciones al requerimiento total de energía para el PLA1.	180
Figura 84.	Comparativa de uso de energía entre polímeros.	181
Figura 85.	Comparación de la contribución al cambio climático de diferentes polímeros y PLA.	182

TABLAS

Tabla 1. Tipos de capital	20
Tabla 2. Impactos ambientales en relación a la entrada y salida de materiales, energía y emisiones... 34	34
Tabla 3. Categorías y subcategorías de los ecomateriales.	40
Tabla 4. Fuentes de producción de biomasa residual.	47
Tabla 5. Ejemplos de residuos agrícolas y agroindustriales y su producción en México.	48
Tabla 6. Consumo de agave y producción de bagazo en el primer trimestre 2012.	54
Tabla 7. Tipos de fibra de bagazo.	56
Tabla 8. Clasificación de polímeros biodegradables.	62
Tabla 9. Bioplásticos biodegradables actualmente en el mercado.....	62
Tabla 10. Tierra con potencial para la producción de biopolímeros.	66
Tabla 11. Propiedades físicas del PLA.	73
Tabla 12. Propiedades mecánicas del PLA.	74
Tabla 13. Comparación de propiedades mecánicas del PLA con plásticos petroquímicos.....	74
Tabla 14. Propiedades ópticas del PLA.	74
Tabla 15. Solubilidad del biopolímero PLA.	75
Tabla 16. Propiedades de procesamiento del PLA grado extrusión.....	75
Tabla 17. Propiedades mecánicas a tensión de la fibra del Agave tequilana.	77
Tabla 18. Composición química de diferentes fibras de agave.....	78
Tabla 19. Composición del bagazo de agave tequilero.	78
Tabla 20. Formulaciones utilizadas durante la experimentación.....	81
Tabla 21. Parámetros de extrusión.....	82
Tabla 22. Formulaciones utilizadas en las pruebas de tensión.....	85
Tabla 23. Resistencia a la tensión del PLA, y diferentes formulaciones del compuesto PLA/FAT.....	85
Tabla 24. Comparación de propiedades del biocompuesto PLA/FAT con otros biocompuestos reforzados con fibras naturales.....	87
Tabla 25. Comparación de propiedades del PLA, compuesto PLA/FAT y algunos plásticos petroquímicos comunes.....	88
Tabla 26. Formulaciones utilizadas en las pruebas de flexión.....	89
Tabla 27. Resistencia a la flexión de diferentes formulaciones de material compuesto.	90
Tabla 28. Formulaciones utilizadas en las pruebas de impacto.....	91
Tabla 29. Energía absorbida al impacto de materiales compuestos.	91
Tabla 30. Energía absorbida al impacto del biocompuesto PLA/FAT.	92
Tabla 31. Densidad de biocompuesto PLA/FAT.....	94
Tabla 32. Densidad del biocompuesto PLA/FAT en comparación con distintos materiales.....	94
Tabla 33. Efecto de la fibra de agave tequilero en las propiedades térmicas del biocompuesto PLA/FAT	97
Tabla 34. Formulaciones utilizadas en las pruebas de absorción de agua.	100
Tabla 35. Comparación entre pesos obtenidos de las muestras después de 48 horas.	100
Tabla 36. Definiciones en relación con los plásticos biodegradables.....	106
Tabla 37. Métodos estandarizados para determinar la degradación de plásticos.	107
Tabla 38. Formulaciones utilizadas en el procesamiento.	118
Tabla 39. Comparación de parámetros de extrusión.....	119
Tabla 40. Precio de distintos bioplásticos y termoplásticos petroquímicos comunes.	123
Tabla 41. Precio de las materias primas.....	124
Tabla 42. Gastos directos de producción.....	124

Tabla 43. Costo de producción por 1Kg de pellets de biocompuesto PLA/FAT.	124
Tabla 44. Costo del procesamiento del biocompuesto PLA/FAT30.	125
Tabla 45. Ejemplos de productos biodegradables actualmente en el mercado.	136
Tabla 46. Opciones de fin de la primera vida para el biocompuesto PLA/FAT.	144
Tabla 47. Compatibilidad entre termoplásticos.	159
Tabla 48. Adhesivos y sus aplicaciones en productos de madera.	161
Tabla 49. Test de Análisis.	163
Tabla 50. Plantas de compostaje en México.	167
Tabla 51. Generación de residuos sólidos urbanos por tipo de residuo de 1992 al 2008.	170
Tabla 52. Energía Inherente de Algunos Materiales Comunes.	172
Tabla 53. Propiedades mecánicas de algunas fibras naturales.	176
Tabla 54. Consumo de energía fósil para algunos materiales importantes.	176

Resumen

La constante construcción y modificación del ambiente artificial que nos rodea ha implicado con el paso del tiempo un aumento en la demanda de recursos para responder a esta necesidad, la dependencia por lo recursos de origen no renovables ha impulsado a cuestionarlos ya que contradicen la idea de un modelo de desarrollo encaminado a la sustentabilidad. La visión sistemática que ofrece la sustentabilidad nos lleva a cuestionar no sólo el origen de los recursos para fabricar materiales, sino también todas las prácticas durante el ciclo de vida de los mismos, ya que representan distintos impactos ambientales que son parte de la problemática ambiental detrás del mundo material. El aprovechamiento de residuos surge como una estrategia esencial para maximizar el uso que le damos a los recursos naturales que procesamos, cualquier material desechado, sea renovable o no renovable, tiene potencial para ser reutilizado o reciclado hasta que se demuestre lo contrario.

El uso de las fibras duras naturales como agente de refuerzo ha estado presente desde hace miles de años en distintas partes del mundo y su uso no ha cesado desde sus inicios. Desde hace varias décadas se ha experimentado con distintas fibras con el objetivo de aprovechar recursos de origen renovable para fabricar materiales de construcción. El término de materiales biocompuestos se desarrolló con el objetivo de hacer materiales compuestos con el menor impacto ambiental posible, lo cual ha sido un detonante para retomar el interés por materias primas obtenidas de recursos renovables, como las fibras naturales que han demostrado su potencial para conformar materiales. Existen distintas investigaciones acerca de la elaboración y el análisis de las propiedades de materiales biocompuestos biodegradables, en las cuales se han utilizado como refuerzo distintas fibras naturales como: sisal, yute, abaca, lino, etc.

A partir de la fundamentación teórica y la revisión de los antecedentes se propone la experimentación para elaborar un material biocompuesto con una matriz a partir de un biopolímero de poliácido láctico (PLA), y como agente de refuerzo fibras de bagazo de *Agave tequilana* Weber (FBAT), la industria del tequila desecha miles de toneladas de bagazo de agave cada año, el cual se puede procesar para obtener fibras duras. El desarrollo experimental se realizó primero a nivel laboratorio en las instalaciones del Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY), en la ciudad de Mérida. Como segunda etapa del desarrollo experimental se realizaron pruebas a nivel industrial en la empresa Plastilam S.A. de C.V en el Estado de México. En las instalaciones del CICY se utilizó el método de extrusión con un dado plano para elaborar muestras, con lo cual se obtuvieron láminas de 10cm de ancho por ± 2 mm de espesor, con diferentes concentraciones de fibra de bagazo de agave. A partir de la elaboración de probetas se realizaron distintas pruebas para analizar propiedades mecánicas, físicas y térmicas. El contenido de fibra en el biocompuesto se presenta como una variable que determina en ciertas propiedades un aumento o detrimento de resistencia. Se obtuvo apoyo para realizar pruebas a nivel industrial, las cuales aportaron información importante acerca de la variación de los parámetros de procesamiento al momento de escalar los métodos de producción. Se lograron extruir diferentes perfiles y láminas del biocompuesto, obteniendo una buena integración de la mezcla de los componentes. Las muestras elaboradas presentan acabados más heterogéneos a diferencia de las que se obtuvieron durante la experimentación a nivel laboratorio.

El análisis cuantitativo y cualitativo de las propiedades del biocompuesto PLA/FAT nos permiten determinar que su uso es óptimo en ambientes interiores, que no impliquen una exposición a niveles altos de humedad durante tiempos prolongados, ni cambios de temperatura extremos. El material biocompuesto PLA/FAT tiene potencial para utilizarse en distintas aplicaciones dentro del vasto campo de productos utilizados en ambientes interiores, lo cual requiere de mayor investigación, experimentación y diseño para complementar nuestro conocimiento acerca del mismo. En el momento de la disposición final del biocompuesto es posible obtener recursos que pueden volver a integrarse al inicio del ciclo productivo. En primera instancia a partir de la biodegradación del material por medio del compostaje se puede obtener compost, que se utiliza como fertilizante natural de alta calidad. El PLA es un biopolímero termoplástico lo cual permite reciclar el material proveniente de la merma durante la producción (preconsumo), así como el material desechado al final de la vida útil de un producto determinado (postconsumo).

Palabras clave: ambiente artificial, biocompuestos, fibras naturales, biopolímero, reciclado, *Agave tequilana*, fibra de bagazo, poliácido láctico, diseño ecológico, ciclo de vida, propiedades.

Introducción

La preocupación en el campo de estudio del diseño por contrarrestar la problemática ambiental actual, ha llevado a la generación de bases teóricas y prácticas para mejorar el diseño y la construcción del ambiente artificial en el que vivimos. El Diseño Ecológico se presenta como una importante metodología con el objetivo de transformar el modelo de desarrollo tecnocéntrico a uno ecocéntrico, buscando equilibrar de manera inicial la industria con el medio ambiente, lo cual no podemos afirmar que sucede en la actualidad. La visión del diseño ecológico no puede obviar la pertenencia de las interacciones de la industria con el medio ambiente, a un sistema más amplio y complejo, en el que las acciones de cualquiera de sus partes tienen como consecuencia impactos de diversas índoles en los pilares; social, cultural, ambiental y económico.

El ser humano ha tenido desde sus inicios la necesidad de transformar su entorno para lograr adaptarse a él, es parte de nuestra naturaleza la manipulación de materiales y la creación de tecnología para hacerlo, motivada por distintos objetivos: desde la fabricación de herramientas, armas, la construcción de casas, la confección de ropa, hasta la expresión artística. En la actualidad es abrumante la cantidad y variedad de materiales y los objetos que requerimos para sustentar las sociedades en el mundo, que bien denominó Abraham Moles como *superindustrializadas*, y que necesariamente dependen de una infraestructura material para existir. Esta necesidad material ha sufrido una transición de la dependencia de recursos renovables hacia una con mayor demanda por los recursos no renovables, lo cual se presenta como una de las principales limitantes para sustentar esta necesidad a largo plazo. Dependemos de muchos procesos y materiales que implican impactos ambientales con repercusiones severas en la calidad del medio ambiente y lo vemos reflejado en: la deforestación masiva, la destrucción de ecosistemas, la contaminación del agua y el aire, las afectaciones a la salud humana y muchas otras consecuencias. Esta dependencia está fuertemente arraigada en el funcionamiento de los sistemas socioeconómicos, lo cual no nos permite hacer cambios radicales ni inmediatos para remediarla, por lo que debemos proponer alternativas viables para encaminarnos hacia un desarrollo sustentable. El desarrollo teórico en relación con los campos de estudio del diseño y la sustentabilidad aportan una guía para el desarrollo y la producción de nuevos materiales, lo que impulsa a cuestionar los sistemas que conforman dichos materiales y no sólo las propiedades técnicas de los mismos. El Diseño de Ciclo de Vida surge como una metodología que pretende analizar de manera más amplia el ciclo de vida de los productos y servicios que diseñamos, con el objetivo de que sea continuo, para dinamizar el flujo de energía y materiales y promover una transición de sistemas lineales a sistemas cíclicos. La percepción del material como un ciclo y no como mera materia disponible para utilizarla, nos hace conscientes sobre las posibles afectaciones en todas sus etapas, lo cual permite establecer una base para diseñar una estrategia de ciclo de vida.

La *desmaterialización* más allá de ser un concepto con una connotación utópica en relación a nuestra realidad material, se presenta como una importante reflexión acerca de la intensidad material y energética detrás de los mecanismos que dan pie al sistema de producción y consumo, así como una guía para establecer estrategias de diseño mediante distintos puntos de acción para lograr el cambio hacia una sociedad que administre con más eficiencia sus recursos. El aprovechamiento de residuos como materia prima se presenta como una noción esencial para hacer más eficiente nuestro consumo de recursos naturales, lo cual también puede disminuir el consumo de energía para lograr los procesos productivos. El reuso y el reciclaje son parte de la historia de la humanidad, sin embargo a partir de la era moderna corresponde la preocupación por realizar estas acciones con un objetivo ecológico, organizadas en industrias para procesar una parte de la cantidad masiva de residuos que producimos. La Ecología Industrial considera la concepción de *metabolismos industriales* al referirse al aprovechamiento de los residuos de una industria como los nutrientes para lograr la etapa de producción en otra, lo cual enfatiza la importancia de la reintegración de la materia residual al ciclo productivo.

Los antecedentes en investigación acerca del uso de biomasa como agente de refuerzo para la elaboración de materiales compuestos demuestran la factibilidad y la oportunidad para aprovechar cientos de toneladas de materiales renovables que se consideran residuos y que pueden utilizarse como materia prima para fabricar materiales. El uso de fibras naturales duras es extenso a lo largo de la

historia, ya que sus propiedades han permitido darles una gran cantidad de usos, el refuerzo de materiales compuestos con fibras naturales se rastrea hasta Israel y Egipto, desde el año 800 a.C. con la fabricación de ladrillos reforzados con paja. La exploración y experimentación con este tipo de materiales ha recorrido un largo camino, a partir del S.XIX existe un importante auge de innovación tecnológica, así como en el desarrollo de nuevos materiales y aleaciones, lo cual afectó de forma directa la evolución de los materiales compuestos, destacando el uso de los polímeros petroquímicos reforzados con fibras naturales duras, como el cáñamo, henequén, coco, yute, henequén, etc. y artificiales como la fibra de vidrio y de carbono. El uso de resinas y adhesivos son necesarios tanto para la unión de las partículas y fibras de cualquier material compuesto, así como también para mejorar sus propiedades, la problemática que se detecta es la emisión de contaminantes por su implementación, así como la dificultad para reciclar ciertas mezclas de materiales. Los biopolímeros son polímeros elaborados a partir de recursos renovables y no renovables que pueden o no ser biodegradables. El uso de los biopolímeros es una realidad, aunque siguen representando una porción mínima del mercado en relación a la producción de polímeros petroquímicos. Las tendencias de mercado indican un aumento en la demanda de los biopolímeros, que hasta el momento ha sido dominada por la fabricación de productos con un tiempo de vida corto, como por ejemplo envases de productos de consumo, botellas y empaques, pero también se utilizan en productos que exigen mayor resistencia como; carcasas para electrodomésticos, paneles para la industria automotriz, etc. lo que indica que podría haber oportunidades en otros campos de aplicación. Surgen distintos cuestionamientos y retos alrededor del uso de los biopolímeros que no deben pasar desapercibidos, ya que el hecho de que provengan de recursos renovables no implica que sean sustentables.

El término de los biocompuestos se creó para denominar aquellos materiales compuestos elaborados completa o parcialmente de materia prima de origen natural y renovable, con el objetivo de disminuir los impactos ambientales durante su ciclo de vida. Los materiales biocompuestos tienen un gran potencial para implementarse en la práctica del Diseño Ecológico, con los cuales se pretende ofrecer ventajas como la disminución de sus impactos ambientales, el aprovechamiento de biomasa, el uso de materias primas a partir de recursos renovables y la capacidad de biodegradarse al final de su vida útil. Con el objetivo de disminuir los impactos ambientales durante el ciclo de vida de un material se propone como caso de estudio la elaboración de un material biocompuesto biodegradable, con una matriz a partir de un biopolímero de ácido láctico (PLA) y como agente de refuerzo fibras de bagazo de *Agave tequilana* Weber. En el proceso de elaboración del tequila se generan miles de toneladas de bagazo que aunque se le ha dado distintas aplicaciones, no se ha logrado un aprovechamiento integral de este residuo. Por medio del análisis de distintas propiedades del material biocompuesto se pretende obtener información para poder determinar de manera más verosímil en que aplicaciones se puede implementar.

Esta investigación surge con un gran interés por exaltar la importancia del trabajo multidisciplinario para desarrollar propuestas con una visión más holística de los problemas que nos damos a la tarea de resolver. La naturaleza compleja del ambiente artificial en el que vivimos exige que amplíemos nuestra visión y conocimiento para lograr transgredir las limitantes que nos impone el sistema de producción y consumo actual, con el objetivo de ser una sociedad más consciente y sustentable.

CAPÍTULO I

Sustentabilidad y La Problemática Material del Desarrollo Humano

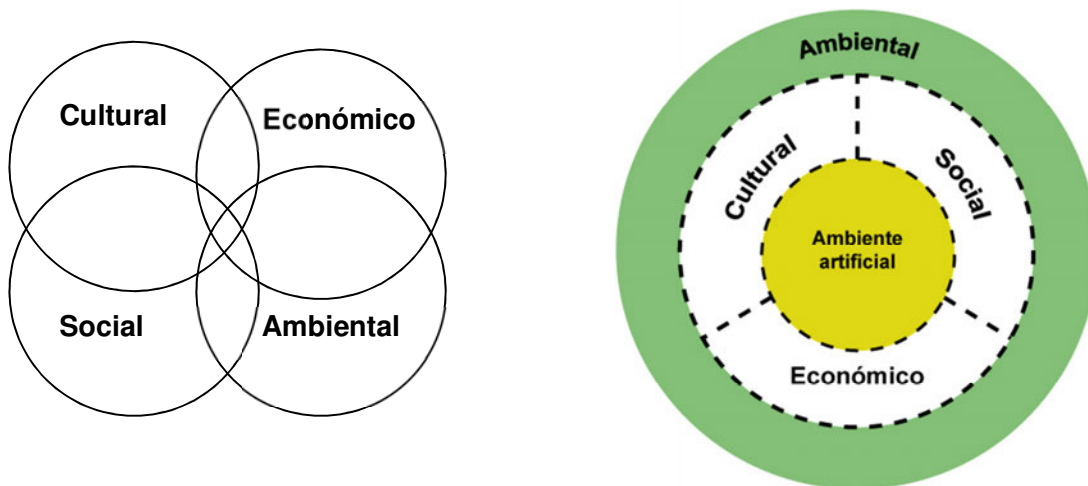
El término sustentabilidad ha sufrido una creciente vulgarización con el paso del tiempo, alejándose de su significado e implicaciones, para convertirse en una palabra a la que cada quien le otorga un significado diferente. Retomando a Freud (citado por Maldonado, 1998) en relación a su parecer frente al término de naturaleza, nos inclinamos a pensar que es el estado actual de la palabra sustentabilidad, “*Se usa románticamente, encubre una abstracción vacía, desprovista de todo interés práctico*”. Esto no significa que debamos tener aversión a la idea, sino que es necesario comprender sus implicaciones y amplitud.

El término desarrollo sustentable se define en el informe de la Comisión Brundtland como:

“(...) el proceso capaz de satisfacer las necesidades de las generaciones presentes, sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras de satisfacer las suyas” (WCED, 1987)¹

El Reporte Brundtland es un documento importante por su exposición a nivel internacional, y por retomar la iniciativa de cuestionar las ideas de desarrollo. En el año 2003 en la UNESCO, se propusieron los cuatro pilares de la sustentabilidad: social, cultural, económico y ambiental. De este modelo se puede inferir un diagrama en el que se tome en cuenta la relación jerárquica de los cuatro pilares. En la realidad el pilar ambiental comprende a los otros tres pilares, su existencia es determinante para la subsistencia de los otros pero no siéndolo de manera inversa.

Figura 1. Modelo de sustentabilidad.



Fuente: Modelo de sustentabilidad de la UNESCO, 2003.

¹ Comisión Mundial para el Ambiente y Desarrollo (WCED, World Commission for Environment and Development).

Las fronteras del sistema se representan con una línea punteada ya que en realidad son inexistentes, las creamos para tener un orden mental y poder analizar los componentes, la interacción entre todos los factores ocurre incesantemente. Surge como necesario alejar el término desarrollo de su implicación con el deterioro ambiental, de esta manera el adjetivo sustentable otorga ciertas características al término que confrontan la problemática ambiental, ya que antes se percibía el desarrollo como una cuestión meramente económica en relación directa con el nivel de industrialización.

Desarrollo (Real Academia Española, 2013).

1. m. Acción y efecto de desarrollar o desarrollarse.
2. m. (Economía) Evolución progresiva de una economía hacia mejores niveles de vida.

El desarrollo desde una perspectiva meramente utilitaria se percibe como el crecimiento económico sin importar las consecuencias para lograrlo. La definición de desarrollo en relación a la sustentabilidad, necesita ampliarse para enfrentar la realidad y tratar de lograr una concordancia teórico-práctica. En el campo de la economía, el desarrollo sustentable se plantea en términos de aquel proceso de transformación de los diferentes componentes del *sistema de la sociedad nacional* (Trigo et al., 1991) que implica cambios en la asignación de las inversiones, en las instituciones políticas, en conjunto con las transformaciones de orden tecnológico e informático que garanticen un uso racional de la base de los recursos naturales, y con estos, satisfacer las necesidades y aspiraciones de todos los grupos sociales en el presente y en el futuro. En la nueva vertiente de la economía ecológica el desarrollo sustentable en el plano nacional, enfatiza no solo la importancia de la ineficiencia e ineficacia del mercado como causa de la degradación de los recursos naturales, sino también la necesidad de su gestión eficiente (Sepulveda, 2001, pág. 2).

El concepto de *disociación (decoupling)*, mencionado por la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (Organization for Economic Cooperation and Development, 2006) es importante ya que busca romper el vínculo entre el crecimiento económico y el deterioro del medio ambiente, sin implicar que dicho crecimiento no lo afecte. El medio ambiente lo definiremos en relación a los siguientes argumentos:

(...) el conjunto de factores que influyen sobre los organismos humanos, animales y vegetales, de esta manera nos referimos a un ambiente global dentro de una dinámica integrada e integradora: la de la vida. Con esto se evita la separación y contraposición de la esfera de la naturaleza y por otro lado, la de la humanidad (Viñolas, 2005, pág. 15).

Representa la totalidad del ambiente físico y biológico en el cual un organismo vive. Para los humanos el medio ambiente incluye la estructura social (Yeang y Woo, Dictionary of Ecodesign, 2010, pág. 91).

Cualquier actividad del ser humano implica necesariamente un impacto ambiental, lo cual no tiene que ser percibido como algo negativo. El medio ambiente se compone de ecosistemas que consisten de interacciones constantes entre sus diferentes elementos, implicando un impacto ambiental constante y una afectación a las demás partes del sistema. Los diferentes aspectos que conforman al medio ambiente tienen un nivel de resiliencia², en el sentido de poder recuperarse del impacto recibido y seguir otorgando recursos. Si los impactos ambientales sobrepasan la capacidad de resiliencia, entonces no existe la posibilidad de recuperación del sistema, que implica una degradación acelerada, lo cual ocurre en la actualidad en diversos ecosistemas alrededor del mundo.

En el año 2008 Vezzoli y Manzini introducen el concepto de "*sustentabilidad medioambiental*", refiriéndose a las condiciones sistémicas para que las actividades humanas no perturben los ciclos naturales, tanto a un nivel planetario como regional, más allá de lo que la resiliencia del planeta permite y

² La resiliencia es la capacidad de un ecosistema para superar ciertas perturbaciones sin perder irrevocablemente las condiciones para su equilibrio.

al mismo tiempo no empobrezcan el capital natural, que es aprovechado por todos los organismos vivos. Aquí se añade una limitación importante, la cuestión ética, a partir del principio de equidad que reclama que cualquier persona tiene derecho a la misma cantidad de recursos naturales. Este argumento indica claramente la contradicción que se presenta en el sistema socioeconómico actual, el cual ha demostrado su incapacidad para garantizar la equidad en la repartición de los recursos explotados. La prioridad que se establece para la calidad de vida humana antes que la calidad del medio ambiente es una realidad ineludible pero incongruente, ya que la calidad del medio ambiente determina en gran medida la calidad de la vida humana. La sustentabilidad depende de una reforma sustancial al sistema de producción y consumo, sin intenciones de radicalizar esta postura, ya que un cambio total del sistema es prácticamente imposible, sin embargo la evolución del mismo no tiene por qué plantearse como un objetivo inalcanzable. La cuestión no es que no podamos tender a la sustentabilidad, pero sí lo es hacernos conscientes de la dificultad que esto representa. La búsqueda por un desarrollo sustentable se convierte en una responsabilidad compartida por todos los campos del conocimiento, ya que todos colaboramos con la construcción del ambiente artificial, así como con el desarrollo de los sistemas socioeconómicos. La búsqueda por la sustentabilidad de las acciones humanas no puede lograrse sin un sistema que disponga de medios congruentes con un mismo objetivo, Viñolas lo define como: “*extender equitativamente la calidad de vida humana manteniendo al mismo tiempo la calidad de vida del resto de los seres vivos y de los procesos biológicos en general, basándose en una única noción de bienestar*” (Viñolas, 2005, pág. 14).

El diseño industrial ha estado siempre relacionado con la construcción del ambiente artificial, el cual definiremos de acuerdo al argumento de Ezio Manzini quien habla de una nueva forma de analizar lo artificial como “(...) un sistema de artefactos materiales e inmateriales, en relación y en competencia al mismo tiempo, en un ambiente limitado (...)” (Manzini, 1994, pág. 91). El ambiente artificial está conformado por dicho sistema de artefactos, comprende tanto el patrimonio cultural como el tecnológico no se puede afirmar que la construcción del ambiente artificial se presenta como un objetivo puntual de la actividad del diseño, el sistema que comprende dicho ambiente es demasiado complejo como para reducirlo a una sola tarea. Dentro de este sistema podemos encontrar que las soluciones que ofrece la profesión complementan su construcción, pudiendo ir desde una idea, hasta un artefacto material. La construcción del ambiente artificial ha llevado entre muchas cosas, a la producción de innumerables productos que han evolucionado para conformar una enorme variedad de familias de objetos. Esta creación frenética involucra distintos campos que conforman el sistema de producción y consumo³, que han prosperado gracias al mercado de productos y servicios. Durante años creímos que la búsqueda de nuestro bienestar no tenía límites, que podíamos transformar la naturaleza y producir todo lo que deseáramos sin importar las consecuencias. La búsqueda por la sustentabilidad de nuestro desarrollo ha provocado que se cuestione la participación del diseño dentro de la construcción de un ambiente artificial que ha tenido severos impactos en el medio ambiente.

En primera instancia, el diseño sustentable parece estar en directa oposición con la naturaleza de la sociedad de consumo, la cual los diseñadores industriales y diseñadores de interacción buscan estimular; de ahí parte la dificultad para su implementación en el diseño (Moggridge, 2007, pág. 656).

Desde la perspectiva del diseño industrial se vuelve un objetivo casi ideal y utópico el que un producto sea sustentable, pues la naturaleza del sistema socioeconómico contradice los principios del mismo, lo cual expone la dificultad para utilizar dicho adjetivo para describir a un producto. De manera más realista debemos lograr la creación de productos que tengan un menor impacto ambiental, con el objetivo de ocasionar la menor perturbación a los demás pilares, ya que es imposible no afectar a la sociedad, cultura, economía y medio ambiente con la introducción de un producto en el mercado. Han surgido distintas propuestas con el objetivo de disminuir los impactos ambientales de la construcción del ambiente artificial, al enfocar los objetivos del diseño para conformar parte de un sistema que se desarrolle hacia la sustentabilidad.

³ El sistema de producción y consumo se refiere a un sistema social y tecnológico complejo en el cual se transforman los recursos naturales para proveer de productos, servicios y bienes públicos, que responden a una demanda para el bienestar de una sociedad determinada (Manzini y Vezzoli, 2008, pág. 29).

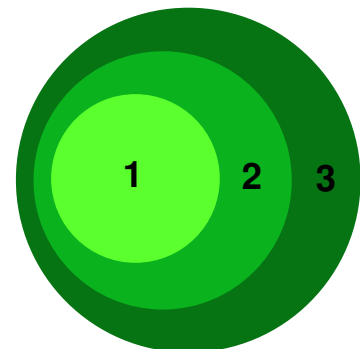
1.1 Diseño Ecológico

Victor Papanek hizo en 1972 una de las primeras críticas objetivas e incisivas hacia la profesión del diseño, que acertadamente califica como dañina y dedicada a cuestiones superficiales para esconder mala calidad y productos que no mejoran nuestra calidad de vida. Es importante destacar que Papanek enfatiza la importancia de los principios básicos de la ecología como base teórica para las metodologías de diseño más allá de la profesión, sino percibiendo el diseño como básico en todas las actividades del ser humano, lo cual implica un cambio de conciencia para dejar atrás los objetivos utilitarios y efímeros del diseño moderno.

El diseño ecológico, también asociado con el término ecodiseño, surge como una metodología cuyo objetivo es disminuir el impacto ambiental a lo largo de todo el ciclo de vida de los productos o servicios diseñados. Los diseñadores están detrás de la construcción de nuestro entorno lo cual implica una gran responsabilidad social y moral. Uno de los primeros usos del término ecodiseño corresponde a la Ecological Design Association (EDA, Asociación de Diseño Ecológico), formada en 1989, cuyo periódico se llamaba *Ecodesign*. Uno de sus argumentos era que *“El diseño de materiales, productos, proyectos y sistemas, como comunidades que sean amigables con las especies vivas y la ecología planetaria”* (EDA, 1989). A partir de 1980 la problemática ambiental se permeó en las sociedades industriales, lo cual introdujo una nueva forma de valor agregado dentro del mercado. La problemática ambiental se “normalizó”, como argumenta Manzini (1994), se convirtió en un tema con el cual se lidiaba de forma técnica, a través de la reducción de sustancias tóxicas, producción limpia, reciclaje de materiales, etc. de pronto estas propuestas se manifestaron como parte del discurso ambiental de la política, economía e ingeniería, para argumentar su papel como parte del pensamiento ecológico y consciente (Manzini, 1994). El diseño ecológico respondía de forma similar al disminuir el impacto ambiental de los productos. Esto no debe menospreciarse, ya que conceptos como el ciclo de vida del producto, y otras estrategias surgieron como parte de esa respuesta.

En 1993 el grupo O2 dio una conferencia llamada *“Striking Visions”*, para visualizar estilos de vida sustentables, exponiendo una visión a largo plazo de los cambios de actitud necesarios para lograrlo. De esta manera se discutió acerca del ecodiseño con el objetivo de avanzar hacia una idea de diseño “sustentable” o “global”. El término diseño sustentable se ha estado utilizando desde mediados de la década de 1990, para hacer referencia a una visión más amplia y a largo plazo del ecodiseño. Se puede hacer una distinción general refiriéndonos a que el ecodiseño sirve como una guía para diseñar productos y servicios, el diseño sustentable implica acción a largo plazo y la consideración sistemática de los problemas. Pauline Madge (1997), define tres niveles de reflexión, en lo que llama los diferentes verdes del diseño:

1. **Diseño Verde (Green Design)** – Dar soluciones superficiales.
2. **Diseño Ecológico o Ecodiseño** – Equilibrar la industria con el medio ambiente.
3. **Diseño Sustentable** – Reconsiderar el sistema actual.



Madge pone en evidencia la diferencia de alcances entre los tipos de diseño orientados a la ecología y sustentabilidad. Las limitaciones de llevar la sustentabilidad a la práctica profesional del diseño no descartan su importancia como base teórica y de guía para los distintos campos del diseño. Es imposible lograr un equilibrio total del sistema productivo con la naturaleza, esta afirmación se utiliza indiscriminadamente, con el propósito de referirnos a que debemos minimizar los impactos ambientales

implicados en nuestro desarrollo. El equilibrio total implicaría que la energía que entra y que sale de dichos sistemas hacia el ambiente fuera equivalente, lo cual significaría una eficiencia utópica del 100%. Nos referirnos a un equilibrio en relación a aquellas acciones que logren un mejor aprovechamiento de los recursos naturales renovables y no renovables mediante prácticas industriales enfocadas a la eficiencia energética y material, haciendo conciencia de que toda interacción con el medio ambiente implica un impacto que puede o no ser negativo.

Definir rígidamente al diseño ecológico contradice la noción de que el pensamiento en el diseño, debe ser adaptable y estar en constante mejora, con el fin de no imponer una definición Janice Birkland, propone una serie de adjetivos que describen el diseño ecológico, enfatizando la noción de un diseño responsable (Design for Sustainability A Sourcebook of Integrated Eco-logical Solutions, 2002, pág. 26):

- Sinérgico
- Contextual
- Holístico
- Potenciador
- Restaurador
- Creativo
- Visionario
- Multidimensional

El *Diseño para la Sustentabilidad*, DPS (*Design for Sustainability*, D4S) según Clark Garrette *et al.* es un concepto de diseño ecológico que ha evolucionado para incluir el aspecto social y económico de la producción (Design for Sustainability: Current Trends in Sustainable Product Design and Development, 2009). En este argumento se integran los tres pilares de la sustentabilidad, para ir más allá de “enverdecer” los productos, adoptando una forma más holística y sustentable de responder a las necesidades de las personas. El DPS está estrechamente relacionado con analizar los impactos producidos a lo largo del ciclo de vida del producto, de manera que se contemple el ciclo de vida completo, de “cuna a cuna” (*Cradle to Cradle*), cambiando la noción actual que va de la “cuna a la tumba” (*Cradle to Grave*). William Mc Donough y Michael Braungart propusieron la teoría de “*Cradle to Cradle*” (2002), en la cual se considera un ciclo de vida del producto que sea continuo para dinamizar el flujo de energía y materiales, haciendo una transición de sistemas lineales a sistemas cíclicos.

En relación a esta teoría, desde la perspectiva de la ecología industrial⁴ se argumenta el ciclo de vida del producto como “*Cradle to Reincarnation*” (De la cuna a la reencarnación) (Graedel y Allenby, 1996), ya que se enfatiza el reuso y reciclaje, y no la etapa de extracción que podría ser el equivalente a la “cuna”. Más allá de la discusión terminológica, lo importante es que ambos argumentos sostienen que no se llega a la muerte del producto, siempre se encuentra en un ciclo de transformación, ya sea para reuso, reciclaje o integración al medio ambiente. La propuesta del DPS no coincide con el término que Pauline Madge presenta acerca del Diseño Sustentable, el cual exige una reestructuración del sistema socioeconómico y de la disciplina. Cabe mencionar que no son el mismo término, y justificadamente se plantea que el diseño es para la sustentabilidad, sin embargo no es sustentable en el sentido estricto de la palabra, ya que no propone un cambio radical en el sistema, con el objetivo de poder proyectarlo hacia la práctica.

La construcción de nuestro ambiente artificial implica necesariamente la transformación de recursos naturales para obtener materia prima y así poder ofrecer la amplia gama de productos, servicios e infraestructura que genera el trabajo de distintas disciplinas. La problemática material dentro del esquema de la sustentabilidad representa sólo una parte del sistema, pero nuestra dependencia hacia la misma nos motiva a cuestionarla, al ser una parte esencial de la participación del diseño en la construcción del ambiente artificial.

⁴ La ecología industrial puede ser definida como un área del conocimiento que busca que los sistemas industriales tengan un comportamiento similar al de los sistemas naturales, cambiando el modelo lineal de los sistemas productivos a un modelo cíclico (Cervantes Torre-Marín, Sosa Granados, Rodríguez Herrera, y Robles Martínez, 2009).

1.2 La problemática material y la construcción del ambiente artificial

Para progresar, el ser humano por naturaleza ha dependido de su capacidad para transformar los recursos naturales que encuentran en su entorno para lograr adaptarse al mismo. La necesidad de transformar estos recursos se convierte en una parte esencial de la problemática material del ser humano, la cual está directamente relacionada con la construcción del ambiente artificial. Todo lo que está hecho por el ser humano con ingenio y habilidad se le puede denominar como artificial, implicando necesariamente la manipulación de un recurso natural. Uno de los principales problemas surge cuando lo artificial deja de ser compatible con la naturaleza, como el vasto repertorio de sustancias que hemos creado y no se pueden reintegrar a los ciclos naturales, representando un peligro para los ecosistemas. La construcción del ambiente artificial con el paso del tiempo ha tenido la tendencia a volverse más incompatible con el entorno natural. El término artificial ha ganado connotaciones negativas, relacionadas con el carácter destructivo y nocivo del progreso industrial, pero si retomamos la idea del ambiente artificial como el medio para adaptarnos al entorno y resolver nuestras necesidades, lo artificial surge como indispensable para el desarrollo del ser humano, por lo que debe ser coherente con el objetivo de mejorar la calidad del medio ambiente que lo sustenta. La problemática material como aquellos recursos naturales que son transformados en materia prima y son utilizados en la construcción del ambiente artificial, representa una parte de nuestra dependencia hacia el medio ambiente.

Necesariamente muchos campos de estudio dependen de la materia prima en el amplio sentido de la palabra, independientemente de que al pensar estemos diseñando, para llevarlo a la práctica requerimos de la materia. Desde el grafito en el lápiz con el que hacemos bocetos, la arcilla para modelar una maqueta, la baquelita en la tarjeta madre de las computadoras que nos permiten proyectar espacios virtuales, el papel para los carteles publicitarios, etc. Nos referimos a la materia prima como el material básico del cual está hecho un producto. La materia prima de un mueble de encino sería, el tronco del árbol después de cortarlo, para obtener los materiales para construir el mueble es necesario que ocurran distintos procesos de transformación para convertir el tronco de un árbol, el recurso natural, en una serie de tablas, polines, o algún producto maderero que se pueda utilizar para la fabricación de muebles. Al momento de darle uso a una materia prima se le denomina como material, algunos pasan por procesos adicionales de producción para conformar materiales específicos (aleaciones, compuestos, etc.). La materia prima y la energía, se producen a partir de los siguientes recursos:

- **Recursos naturales o vírgenes**
- **Recursos reciclados**

Los recursos naturales (ver **Anexo 5. Clasificación de los Recursos Naturales**) provienen de la Geósfera⁵ y pueden clasificarse como:

- **Recursos renovables:** cuando la rapidez de su regeneración es igual o mayor a la de su consumo.
- **Recursos no renovables:** cuando la rapidez de su regeneración es menor a la de su consumo. Se pueden agotar, no existe en la actualidad un proceso natural o artificial mediante el cual se puedan producir.

Podemos definir la problemática material del ser humano en función de la necesidad por obtener distintos recursos de la naturaleza para subsistir y proveer a los sistemas que se necesitan satisfacer. Los sistemas pueden referirse tanto a un individuo, que sería un sistema vivo, o un sistema artificial (como parte del ambiente artificial), por ejemplo el transporte público de una ciudad. Los sistemas vivos y artificiales dependen del aprovechamiento de la materia y la energía para sobrevivir, sin excepción alguna. La problemática se presenta cuando la totalidad de sistemas que satisfacen el desarrollo humano, requieren de un volumen de recursos tal que no permite su regeneración natural, o cuando no se toma en cuenta una gestión de los recursos más eficiente.

⁵ Geósfera: Es la suma total de masas de tierra y agua del planeta. Definición utilizada por Vezzoli y Manzini (Design for Environmental Sustainability, 2008, pág. 56).

La evolución de la industrialización ha implicado un consumo masivo de recursos desconociendo las consecuencias de la explotación del medio ambiente, asumiendo que los recursos que hay en él son infinitos. La problemática de la gestión de recursos naturales, o mejor dicho la gestión de los recursos que consume el ser humano, (no podemos asumir que la gestión de los recursos naturales de manera general está en nuestras manos, sería una postura absurdamente antropocéntrica) se convierte en un factor determinante para que las sociedades contemporáneas perduren. “*Los factores que están en riesgo frente a la problemática ambiental no son recursos naturales específicos, sino un sistema que soporta la vida.*” (Lovins, Hawken, y Lovins, 1999, pág. 4). Los recursos naturales se valoran como simples insumos que forman parte del sistema de producción y consumo, tomando únicamente en cuenta su valor económico y de uso. No se valora su importancia dentro de los distintos ecosistemas de los cuales se extraen, no implica que no haya personas que si lo hagan, pero en relación a la obtención de recursos se pretende que el fin justifique a los medios lo cual amenaza con afectar la propia estabilidad del sistema.

La devaluación del capital natural

Desde una perspectiva económica se puede analizar la problemática material como parte del capital natural que se requiere para proveer de materiales y energía a un sistema socioeconómico. La definición tradicional de capital es la riqueza acumulada en forma de inversiones, propiedades, equipo, etc. de este modo la economía necesita cuatro tipos de capital para funcionar correctamente:

Tabla 1. Tipos de capital

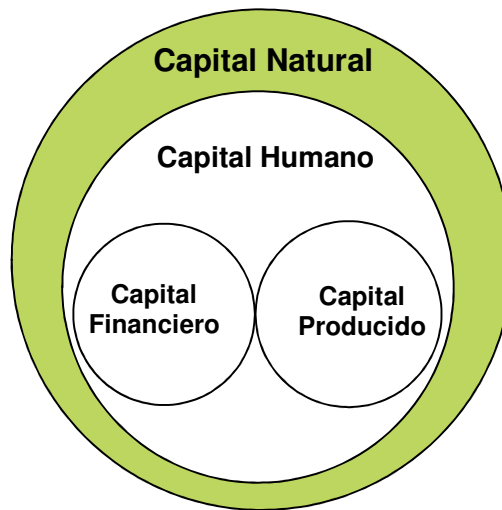
Capital	Descripción
Capital Natural	Recursos, sistemas vivos y servicios del ecosistema, (p. ej. agua, alimentos, tierra, etc.)
Capital Humano	Inteligencia, mano de obra, cultura y organización
Capital Financiero	Dinero, inversiones e instrumentos monetarios
Capital Producido	Infraestructura, máquinas, herramientas y fábricas

Fuente: Elaboración propia a partir de información del libro *Natural Capitalism. Creating the Next Industrial Revolution* (Lovins, Hawken, y Lovins, 1999).

Es posible encontrar diferencias en las clasificaciones de los tipos de capital, como la de la UNEP (Vital Geo Graphics, 2009, pág. 67), donde se añade el capital social y el capital físico, los cuales están incluidos en el capital humano y producido según la clasificación de Lovins. El sistema industrial utiliza los tres últimos tipos de capital para transformar el capital natural en las cosas con las que interactuamos diariamente: automóviles, carreteras, casas, ciudades, comida, escuelas, etc. El capital natural se refiere a todos los recursos naturales que el ser humano conoce: árboles, agua, aire, minerales, etc., pero también comprende a los ecosistemas (Lovins, Hawken, y Lovins, 1999).

De manera similar a la representación del modelo de sustentabilidad, el capital natural aparece como un sistema que contiene a los demás subsistemas, siendo en este caso los otros tipos de capital, la desaparición del primero impediría el desarrollo general. Consecuentemente el capital humano es indispensable para que exista el capital financiero y el capital producido. Aun cuando la automatización independiza de cierta forma la producción de la intervención del hombre, sigue siendo necesaria la participación de técnicos, así como de diseñadores e ingenieros que hacen las máquinas.

Figura 2. Esquema de tipos de capital.



Fuente: Elaboración propia a partir de información del libro *Natural Capitalism. Creating the Next Industrial Revolution* (Lovins, Hawken, y Lovins, 1999).

Las representaciones de capital están interconectadas y sabemos que el consumo de capital natural es imprescindible para el ser humano, entonces la administración del mismo emerge como parte crítica, la cual no hemos podido articular con eficiencia. De que sirven todos los premios Nobel de economía y las celebradas prácticas de negocios que enorgullecen a los profesionales, si no hemos podido administrar los recursos naturales que el ser humano ha tenido que aprovechar desde sus inicios.

El precio de las materias primas no corresponde al costo real de explotación de los recursos naturales, no se toma en cuenta los impactos ambientales que ocurren en los procesos para obtenerlas, como la contaminación de mantos acuíferos y el aire, deforestación, pérdida de biodiversidad por la alteración de los ecosistemas, etc.

La humanidad ha heredado un almacén de capital natural con 3.8 billones de años de antigüedad. Si continúa el ritmo actual de consumo y degradación, quedará muy poco al final del s. XXI. No es sólo una cuestión de estética, esta preocupación les corresponde a todas las sociedades y personas. A pesar de las leyes y campañas que pretenden disminuir la pérdida, la provisión de capital natural disminuye aclaradamente así como los elementos vitales que provienen del mismo y son críticos para nuestra prosperidad (Lovins, Hawken, y Lovins, 1999, pág. 3).

El valor del capital natural queda prácticamente excluido del sistema capitalista, a pesar de ser el tipo de capital que mantiene al sistema socioeconómico, lo cual se presenta como su mayor contradicción. La noción del valor real del capital natural no pretende la valorización económica de los impactos ambientales, sino la responsabilidad por parte de aquellos involucrados en su causa. El término de capital natural se puede presentar como demasiado tecnocéntrico, pero aporta un punto de vista que expone claramente la dependencia hacia los recursos naturales y la incoherencia con el valor que se les otorga dentro del sistema socioeconómico, comparado con el impacto real de su consumo en el mundo. El capital natural se presenta como un sistema muy amplio ya que engloba todos los recursos, y servicios que obtenemos de los ecosistemas, en relación con la construcción de nuestro ambiente artificial nos enfocamos en el consumo de recursos naturales para la producción de materiales.

Dependencia por el desarrollo material

La construcción del ambiente artificial siempre ha requerido de diferentes tipos de materiales que han cambiado con el paso del tiempo. Para tener una perspectiva general del desarrollo de algunos materiales importantes a lo largo de la historia, se presenta una línea del tiempo (**Figura 3**) a partir de la información que presenta Michael Ashby. La escala de tiempo no es lineal, pero nos permite ver la reducción sustancial del lapso de tiempo entre cada descubrimiento a partir del año 1500 y el comienzo de la Edad de Acero. Podemos observar que a cada etapa de la historia de la humanidad, le corresponden diferentes materiales que han jugado un papel clave en el desarrollo de las sociedades. Necesariamente al referirnos a un material podemos hacer una relación con una tecnología específica, de esta manera la historia de los materiales es la historia de la tecnología. Esta relación puede ocurrir de forma bidireccional, tanto el descubrimiento de materiales deriva en el desarrollo de tecnología, como el desarrollo tecnológico deriva en el desarrollo de nuevos materiales.

La explotación de recursos naturales y el desarrollo de materiales no han ocurrido aisladamente, en las etapas de la historia podemos identificar distintos factores que han servido de impulsores y determinantes de las tendencias de producción y consumo en el mundo. Un aspecto muy importante es el papel de la guerra como impulso fundamental para el desarrollo de nuevos materiales y tecnología en la historia, al promover la investigación para resolver necesidades específicas. Una vez utilizados estos descubrimientos, se ha transferido la tecnología para la producción de productos de consumo público. La relación entre la industria bélica y la historia de la tecnología cobró notable importancia a partir del S.XIX a la par de la revolución industrial en la edad de acero. Un ejemplo notable fue la colaboración de Henry Ford con su conocimiento de la producción en línea, para la fabricación de aviones en la Primera Guerra Mundial. Así como en 1935 la empresa Dupont trabajó arduamente en desarrollar el Nylon® (Poliamida), para reemplazar la seda y el cáñamo asiático, utilizados en los paracaídas y uniformes militares. A partir de esto al material se le han dado diferentes usos, siendo indispensable para la producción de cientos de productos cotidianos. El desarrollo tecnológico y por lo tanto material de la humanidad se ve afectado por distintos factores que varían de acuerdo al tiempo, lugar y cultura, destacando su carácter sistemático y complejo.

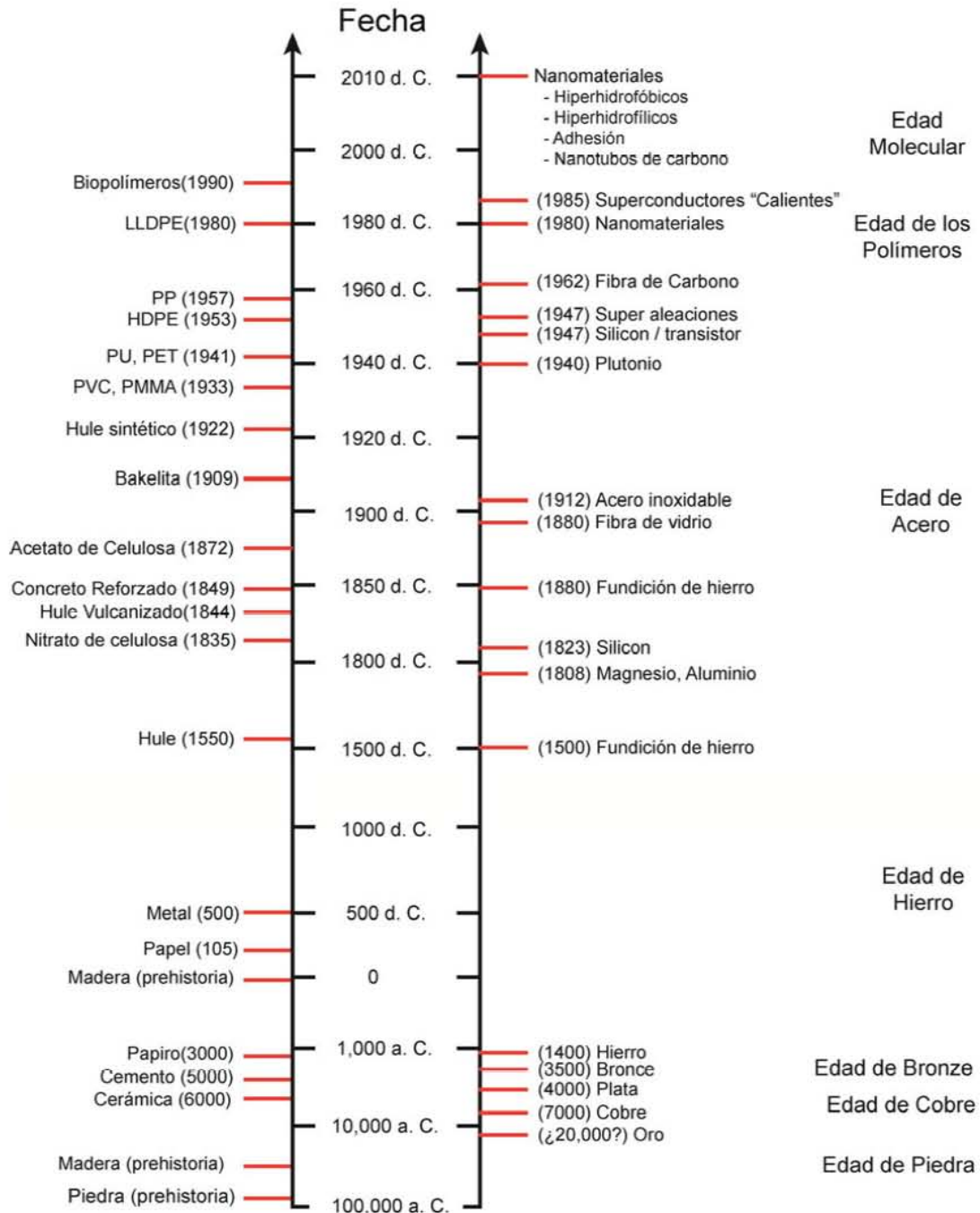
El acelerado desarrollo de la cultura material en las sociedades se ve reflejado en la disminución del tiempo entre nuevos descubrimientos. Podemos tomar como punto de referencia la creación de la Bakelita en 1909, a partir de la cual se descubrieron muchos otros plásticos que dominan el mercado como el Polipropileno (PP), Polietileno Tereftalato (PET), Poliuretano (PUR), Policloruro de Vinilo (PVC), Polietileno (PE), entre otros. En un lapso de cien años (1909 - 2009), el desarrollo de nuevos materiales ha sido abrumador, en comparación con los trescientos años transcurridos entre la primera fundición de hierro y el descubrimiento del aluminio (1500 - 1808), sin que haya innovaciones sustanciales entre estos dos eventos.

La producción de materiales se relaciona directamente con el uso de la energía, lo cual se presenta como otro de los grandes problemas de las sociedades contemporáneas. Para obtener recursos materiales necesitamos energía, así como para obtener energía también necesitamos de recursos. De igual manera podemos encontrar que el consumo de agua se vuelve indispensable para las operaciones de extracción y producción, su abastecimiento es un punto crítico para el funcionamiento del sistema (sin olvidar la vitalidad de su consumo para nuestra supervivencia). No se contempla el análisis de estos puntos en la presente investigación, sin embargo es necesario mencionarlos con la finalidad de no obviar la importancia de su interrelación.

Es importante destacar que la extracción y transformación de recursos naturales ha cambiado a través de la historia, en la que se puede apreciar un cambio hacia la dependencia de los recursos no renovables. Aproximadamente durante los últimos 300 años, el desarrollo humano dependía principalmente de recursos renovables como: madera, piedra, fibras naturales, etc., los recursos no renovables se utilizaban en una menor proporción, como el hierro, cobre, zinc, etc. (Ashby, 2009). Con el paso del tiempo el consumo de este tipo de recursos aumentó, hasta llegar al punto en el que dependemos casi totalmente

de los recursos no renovables, donde podemos identificar la Revolución Industrial como una fuerte influencia para el inicio de esta tendencia.

Figura 3. Línea del tiempo de los materiales.

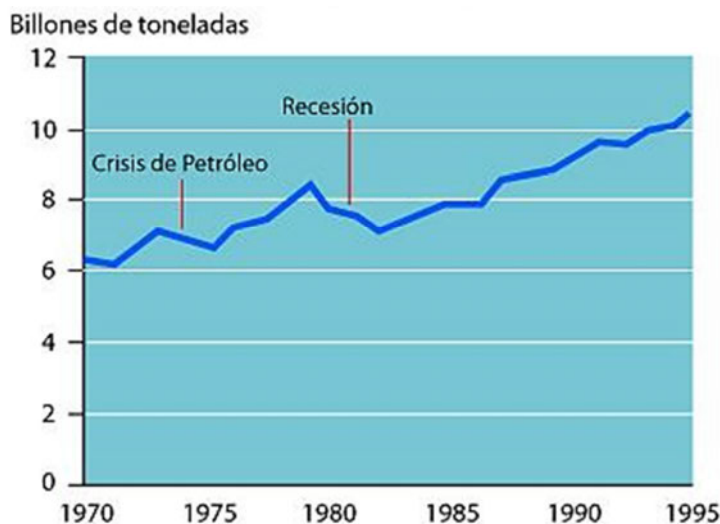


Fuente: Adaptado de la información del libro Materials and the Environment: Eco-Informed Material Choice (Ashby, 2009, pág. 18).

Algunos cambios importantes a partir del año 1800 fueron marcando esta transición, primero los metales como el hierro y el acero se volvieron más adecuados para nuevas aplicaciones en estructuras para la construcción y el transporte, como la máquina de vapor, sin embargo la madera⁶ no dejó de ser utilizada, se implementó como parte importante de los vagones en los trenes de pasajeros y carga. Más adelante (aprox. en el año 1900) el concreto desplazó a la madera en las grandes estructuras (Ashby, 2009), pronto los metales se convirtieron en los materiales dominantes en la ingeniería, lo cual abrió un mundo de posibilidades de aplicación, que permitió responder a los problemas constructivos que surgían como respuesta a el desarrollo de las sociedades industrializadas. En muchos casos se reemplazaron los materiales renovables, debido a la obtención de mejores propiedades y desempeño con el uso de los materiales no renovables. En este sentido nuestra dependencia material se ha orientado en relación a aspectos funcionalistas, lo cual ha respondido exitosamente a los requerimientos técnicos de las sociedades, pero nos ha llevado a menospreciar otros factores involucrados. El uso de recursos renovables no garantiza la disminución del impacto ambiental de nuestro desarrollo, pero su correcta gestión permite su regeneración para seguir aprovechándolos, lo cual se presenta como una ventaja frente al uso de recursos no renovables.

La constante construcción del ambiente artificial depende de diferentes recursos para producir materiales y dar forma a los procesos, productos y servicios que usamos cotidianamente. La problemática no es la extracción en sí, ya que dependemos de esta para subsistir, es la forma desmesurada e inconsciente en que la realizamos. La extracción masiva de materiales tiene consecuencias sociales, culturales, ambientales y económicas, no se pretende analizar todos estos factores a fondo, pero es importante hacer conciencia de la complejidad del problema. Se ha analizado ampliamente la tendencia mundial del aumento en el consumo de recursos naturales a lo largo de la historia, como lo indica la **Figura 4.** donde se muestra el aumento del consumo mundial de materia prima del año 1970 a 1995.

Figura 4. Consumo de materia prima en el mundo.

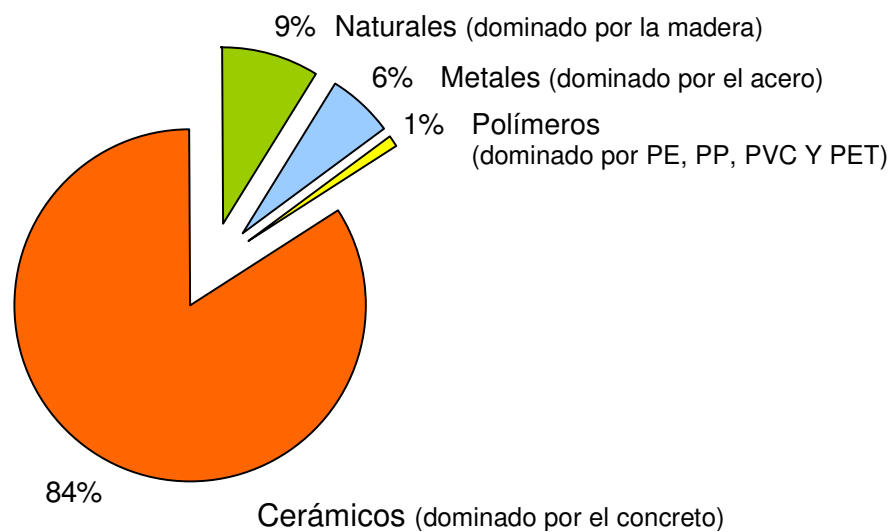


Fuente: Raw material consumption, global trends and US share. (2004). Philippe Rekacewicz, UNEP/GRID-Arendal Maps and Graphics Library. USGS.

⁶ La madera no ha dejado de ser utilizada desde la prehistoria, las aplicaciones de esta materia prima han evolucionado, en algunos casos ha sido desplazada pero seguirá siendo un material indispensable en la industria de la construcción, y la producción de muchas aplicaciones que utilizamos diariamente. La sustentabilidad de la madera la convierte en una materia prima con mucho potencial para el diseño ecológico.

Mundialmente se consumen 10 billones (10^{10}) de toneladas de materia prima por año, un promedio de 1.5 toneladas por persona (Ashby, 2009, pág. 18), pero claramente no ocurre de esta manera, la mayor tasa de consumo corresponde a una minoría de la población mundial. La población de los países desarrollados representa el 22% de la población mundial, pero consumen más del 60% de la materia prima. Michael Ashby realiza un estudio en el cual se cuantifica la producción de 23 materiales de los cuales dependen las sociedades industrializadas. Esto nos permite tener una noción general de la distribución del total de la extracción de recursos para la producción de los siguientes grupos de materiales.

Figura 5. Producción anual de materiales industriales.



Fuente: (Ashby, 2009, pág. 18). Porcentaje en relación al consumo de 10 billones de toneladas que aproximadamente se consumen al año.

El crecimiento de la población mundial se presenta como un factor determinante para el aumento en la producción de materiales. Un mayor número de personas representa un aumento en la demanda de materiales constructivos, en este sentido nuestra dependencia por los recursos no renovables no se puede sustentar a largo plazo, aun cuando las innovaciones tecnológicas nos permiten acceder a reservas que antes no se conocían (en el caso de los minerales) de este modo lo único que estamos logrando es extender una crisis inminente continuando con la explotación y degradación del medio ambiente.

No sólo la cantidad, sino también la complejidad de los materiales ha aumentado con el paso del tiempo, lo cual se refleja tanto en el aumento de la dificultad para extraer los recursos naturales requeridos, como en el desarrollo de artefactos y uso de procesos más complejos para obtener materias primas específicas. Un claro ejemplo de esto es la nanotecnología, donde se logra manipular la materia a una escala atómica. En la medida que se han complejizado las sociedades, economías y la extracción de los recursos naturales para sustentarlas, de igual manera ha sucedido con las variables que definen el impacto ambiental del desarrollo humano. No podemos negar que gracias al aumento de este desarrollo hemos obtenido muchos beneficios, como aquellos materiales que nos han ayudado a resolver grandes retos constructivos, como el acero y el concreto. Debemos cuestionarnos si los beneficios aportados por esta superación tecnológica compensan las afectaciones al medio ambiente así como otros factores involucrados.

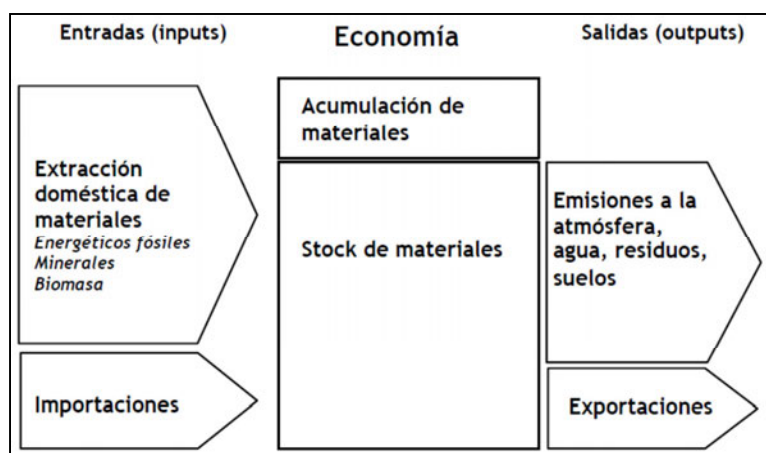
¿Cómo puede responder el diseño ante la problemática de la explotación masiva de los recursos naturales? No se vislumbra como un suceso cercano la disminución del consumo de materiales en el mundo, las disciplinas como el diseño industrial, que tienen una participación activa en la

construcción del ambiente artificial deben proponer alternativas y estrategias para que podamos sustentar nuestro desarrollo con materiales que respondan al crecimiento constante de un sistema insaciable que seguirá demandando recursos. La actividad del diseño se enfrenta actualmente a grandes retos para seguir construyendo el ambiente artificial que nos rodea, no podemos seguir disponiendo de los recursos naturales inconscientemente. Hemos llegado a una saturación en la variedad de materiales y sus aplicaciones, sin una responsabilidad por las implicaciones que tienen su extracción, transporte, producción, uso y desecho, pero con un fin que cumplir dentro del sistema de producción y consumo, ya sea en productos, ropa, casas, etc. el cual se pretende que justifique las acciones para hacerlos realidad. La actividad del diseño tiene que enfocarse una hacia el consumo de recursos naturales que puedan sustentar la construcción del ambiente artificial. Esta construcción está directamente relacionada con los flujos de materiales dentro de los sistemas socioeconómicos, es necesario comprender las limitantes básicas que definen la manera en que ocurren estos flujos.

Flujos de materiales

La metodología de flujos de materiales se esquematiza en la **Figura 6**, nos presenta una descripción general de la entrada (*input*) y salida (*output*) de materiales en una economía, lo cual ayuda a definir parte de la problemática de consumo de recursos. Todos los materiales biológicos, minerales y energéticos que usan una economía se contabilizan en esta metodología exceptuando el agua y el aire. La razón por la que se omiten estos flujos en este modelo, es porque en las economías modernas representan una enorme masa, de un orden de magnitud mayor que el resto de los materiales por lo que normalmente se construye una contabilidad aparte. En este esquema la energía se contempla dentro de los materiales extraídos, ya que son necesarios para su producción.

Figura 6. Flujo de materiales y energía en una economía



Fuente: Información obtenida del artículo La extracción y consumo de biomasa en México (1970-2003): integrando la leña en la contabilidad de flujos materiales, 2007, pág. 3.

Los flujos de materiales y de energía son indicadores indirectos del impacto ambiental de una economía. Éstos nos permiten percibir hasta qué punto esa economía es compatible con el sistema natural que la mantiene. La base conceptual de la contabilidad de flujos de materiales es el *metabolismo social* (Fisher-Kowalski, 1999), que concibe a las economías modernas como organismos vivos que toman del medio ambiente materiales y energía para alimentarse y crecer, y que expulsan hacia el medio ambiente esos materiales después de aprovecharlos, en una forma

distinta o alterada a como los recibieron. Por lo tanto, esta visión reconoce la naturaleza de las economías como sistemas abiertos (Kapp, 1976) que están forzosamente conectados con el medio ambiente que las circunda, y con otros sistemas económicos, mediante flujos de materiales y energía, ocurriendo necesariamente una relación recíproca entre el sistema económico y el medio ambiente. La ecología industrial plantea un argumento similar, refiriéndose a metabolismos industriales asemejando a los organismos naturales que utilizan los residuos de un organismo como nutrientes para su desarrollo. *“La linealidad de los sistemas productivos y la percepción actual del espacio y del tiempo basados en el aquí y ahora, dificultan enormemente la introducción de los referentes biológicos basados en los sistemas cerrados”* (Viñolas, 2005, pág. 110).

Siempre existirá un intercambio de materiales y energía entre el sistema económico y el medio ambiente, en esta relación recae nuestra responsabilidad por moderar la cantidad de recursos que entran al sistema, así como los residuos que salen del mismo. Los sistemas cerrados plantean ciclos en los cuales se recicla al máximo la materia y energía con el objetivo de aprovechar de manera más eficiente los recursos que consume el sistema y desechar la menor cantidad de residuos. En la realidad no existe un sistema completamente cerrado y autónomo, ya que esto hablaría de un sistema ideal completamente independiente del medio que lo rodea. Siempre habrá la necesidad de consumir un recurso y por consecuencia producir un residuo.

Las dos primeras leyes de la termodinámica son fundamentales para entender las limitaciones del flujo de energía y materiales en una economía. En este sentido no se pretende hacer la descripción a fondo de estas leyes, sino entender su significado general el cual describe los límites de los sistemas productivos. La primera, *la materia y la energía no se crean ni se destruyen sólo se transforman*, significa que, todos los materiales que entran en una economía se acumulan en ella o salen de ésta, ya sea en forma de bienes que se exportan a otros sistemas económicos, o bien como residuos y, o energía. El sistema económico no crea ni destruye materia, sólo la modifica para crear utilidad.

La segunda ley de la termodinámica, o ley de la entropía, también es una base importante en esta visión de los sistemas económicos, al señalar el carácter finito de los recursos naturales y, en general, de los materiales que se utilizan en el sistema económico. Dicha ley establece *que la energía se transforma siempre de energía disponible —para el aprovechamiento humano— en energía no disponible o disipada y nunca viceversa* (Goergescu-Roegen, 1977). Una vez que la energía se utiliza en el sistema económico no es posible volver a utilizarla con las cualidades iniciales. Este principio también aplica a la materia. En este sentido se dice que es imposible producir un bien sin generar a continuación un residuo equivalente en forma de materia y energía degradadas (Carpintero, 2005). En términos generales se afirma que lo que entra al proceso económico son *“recursos naturales valiosos y que lo que sale es un desecho sin valor”* (Goergescu-Roegen, 1977). Este argumento no se puede aplicar de manera general, ya que existen recursos naturales a partir de los cuales se producen desechos valiosos, podemos cuestionar por lo tanto, la utilidad de estos residuos, aunque a lo largo de la historia se ha demostrado que el ser humano ha sabido aprovecharlos. Podemos entonces redefinir que: lo que entra en el proceso económico son recursos naturales valiosos, produciéndose necesariamente un residuo, cuyo valor es determinado por la factibilidad de su aprovechamiento.

A manera de un sistema lineal, el flujo de materiales dentro de las economías demuestra su ineficiencia, lo cual nos ofrece un panorama general de la situación. La mala gestión de los recursos naturales y la explotación material desmedida, como partes de la problemática material, demandan que replanteemos nuestros métodos para responder a las necesidades que han emergido de la misma. Los flujos dentro del sistema socioeconómico no deben percibirse como lineales, ya que de esta forma se ignora la posibilidad de cerrar los ciclos productivos para aprovechar de manera más eficiente los recursos naturales que consumimos. No podemos negar nuestra dependencia material y tampoco podemos ignorar que la demanda de recursos seguirá en aumento, entonces ¿Cómo vamos a lograr sustentar el consumo de recursos naturales para la producción de materiales constructivos?

1.3 Desmaterialización

Distintos autores han explorado la idea de la *desmaterialización*, con el fin de reducir los flujos de materiales que entran y salen del sistema socioeconómico. Podemos tomar como referencia inicial la exhibición en el Centro Georges Pompidou *Les Immatériaux* en 1985, curada por el filósofo Jean-François Lyotard. La exhibición estaba basada en la habilidad del ser humano para manipular la naturaleza y los materiales. Tenía como objetivo expresar el cuestionamiento de cómo ha afectado el desarrollo de las nuevas tecnologías, o alguna de las áreas efímeras en las que trabaja la humanidad, a esta relación. Esta exposición con un carácter analítico y reflexivo, se convierte en un antecedente teórico de la desmaterialización.

La idea de la sociedad inmaterial se retoma en 1988 enfocada al diseño, en la doble edición de la revista *Design Issues* llamada "Diseñando la Sociedad Inmaterial" (Designing the Inmaterial Society), uno de los artículos fue escrito por Abraham A. Moles, del cual se extrae la siguiente cita: "*Cualquier sociedad inmaterial estará fuertemente materializada porque sus productos inmateriales necesariamente están conectados a la infraestructura mecánica que los genera, estabiliza y gobierna*" (Moles, 1988, pág. 30). El problema que detecta Moles radica en la relación que establecería el hombre con el nuevo fundamento material, que se convierte en mera decoración del ambiente, excluyéndolo de su conciencia y por lo tanto olvidándolo en beneficio de la imaginería inmaterial. Por eso hace énfasis en la relación dialéctica entre lo material y lo inmaterial.

El rol del diseñador, entonces, no es tanto la creación de "nuevos" objetos que sirvan de soporte para la cultura inmaterial, sino insistir en un ambiente de estabilidad implacable. Antes de introducir algo nuevo el diseñador debe proteger el estado del momento actual, que permite a los individuos participen espontáneamente y con poco esfuerzo en la inmaterialidad del mundo actual (Moles, 1988, pág. 31).

Desde este momento se cuestiona el rol del diseñador en la creación de meros soporte materiales, emerge la necesidad de reestructuración en lugar de efectuar cambios superficiales. La interpretación de Moles se hace desde una perspectiva postindustrial en transición a una sociedad que él llama, *superindustrializada*, la cual ha llevado al extremo las consecuencias de la industrialización.

Otra visión de la desmaterialización se relaciona con la creación de productos y servicios con una nueva visión, que permitan a más personas tener una calidad de vida digna, y que podamos reducir el impacto ambiental de nuestro desarrollo. De esta manera se propuso el concepto de sistemas de productos-servicios, para remplazar el uso de productos por servicios, como una estrategia posible para alcanzar la sustentabilidad. El término "*sistemas de productos-servicios*" (PSS, por sus siglas en inglés) ha sido definido como "*(...) un grupo de productos y servicios comerciables, que unidos son capaces de satisfacer las necesidades de los usuarios. La proporción de productos/servicios en este grupo puede variar, de acuerdo al objetivo a cumplir o el valor económico*" (Goedkoop, van Halen, te Riele, y Rommens, 1999, pág. 18). Por lo tanto, la forma tradicional e intensamente material de poseer un producto para usarlo es remplazada por la posibilidad de responder a las necesidades de los usuarios por medio de servicios desmaterializados, los cual están asociados con cambios en la estructura de posesión.

Varios enfoques y tendencias pueden mencionarse para lograr el desarrollo de los PSS (Mont, 2002):

- La venta del uso del producto en lugar de adquirir el producto como tal.
- El cambio hacia una sociedad de arrendamiento.
- Una sociedad de reparación en lugar de una sociedad de desecho.
- Generar un cambio en las conductas de consumo, de una orientación de ventas hacia una de servicios.

Autores como Jansen y Vergragt han trabajado en el concepto de sistemas de productos sustentables que cruza las fronteras corporativas, e incluye a los accionistas en el proceso. Ezio Manzini propone la idea del diseño estratégico como un nuevo acercamiento para que las empresas se integren a un mercado en una creciente “turbulencia”. El diseño estratégico se enfoca en el proceso de un cuerpo integrado de productos, servicios y comunicaciones, como un modelo para que las empresas logren cambios en la tecnología y la sociedad, y se modifiquen las actitudes de los consumidores.

Joaquim Viñolas se refiere a la desmaterialización como toda práctica que permita reducir la cantidad de materiales necesarios para elaborar un producto, suponiendo un cambio en la asociación entre producto y consumo de los materiales, así como la evolución hacia las ideas de *servicio* y de *producto inmaterial*. Esto pretende dar una respuesta ante el problema del carácter limitado de los recursos y el creciente aumento del transporte. El análisis que Viñolas realiza propone los siguientes medios para tender hacia un *producto inmaterial* (Diseño Ecológico, 2005, pág. 265):

- *Convertir un producto en servicio, o sustituirlo por soportes informáticos. Estas dos estrategias, permiten reducir radicalmente los impactos derivados del consumo de los materiales.*
- *Hacer los productos más ligeros ayuda a reducir el consumo de materiales y energía, pero también facilita la manipulación y el transporte, el almacenaje y distribución de los productos, como es el caso del envase de leche, el cual paso de ser de vidrio, a estar hecho de polietileno, cartón y aluminio (Tetra Pak), lo cual ayuda a que el producto tarde más en descomponerse y redujo el peso y la fragilidad drásticamente. Es necesario prevenir que la posibilidad de hacer algo más ligero, no implique usar materiales con una alta intensidad energética (como el aluminio) o algunos materiales compuestos, ya que pueden implicar otros problemas ambientales anulando el beneficio inicial, lo cual se podría cuestionar en el caso del Tetra Pak.*
- *Existen muchos ejemplos de objetos que han reducido su tamaño sin perder funcionalidad, incluso ganando más cualidades. Un célebre ejemplo son los reproductores personales de música, desde la gran innovación del Walkman, hasta el iPod, podemos constatar más del 50% en reducción de volumen. La reducción de tamaño puede representar un ahorro de materiales, energía y tiempo. El caso extremo es la miniaturización, que consiste en disminuir el tamaño hasta donde permita la tecnología actual. Esto puede representar problemas para el reciclaje, debido a la concentración de componentes, pues se requeriría un alto grado de precisión para desensamblar el producto y reciclar los materiales. Claro que esto es una limitante que puede ser evitada si se consideran las medidas necesarias.*

La desmaterialización se ha presentado como una gran falacia dentro de la era digital, los microprocesadores que permitieron elaborar una gran cantidad de computadoras y electrodomésticos con la promesa de la ligereza y eficiencia, por ejemplo al evitar el uso de un recurso como el papel remplazándolo por los medios digitales, no necesariamente implica que tengan un menor impacto ambiental. En muchos casos es lo contrario ya que la producción de estos objetos implica un gran consumo de materiales y energía, o requiere de materiales compuestos difíciles de reciclar (Thackara, 2005).

La idea de crear metabolismos “industriales” surge como el objetivo de la ecología industrial. Este campo tiene el objetivo de hacer que las instalaciones de parques industriales se asemejen a los sistemas ecológicos. La aplicación que más lo ha demostrado se ha realizado en Kalundborg, Dinamarca, donde una serie de instalaciones industriales están vinculadas, usando el desperdicio de las demás como “nutrientes” para sus procesos. Entre las instalaciones están: una planta de energía, una fábrica de paneles de construcción, una refinería de petróleo que intercambiaban entre sí recursos como la ceniza volante⁷, utilizada como aditivo para darle mejores propiedades al

⁷ La ceniza volante (fly ash) es un subproducto emanado en grandes cantidades durante las operaciones cotidianas de las centrales carboeléctricas. El carbón como fuente de energía es pulverizado y soplado en un

cemento. El desarrollo de los parques industriales ecológicos se enfoca en la importancia de los procesos industriales, en lugar de los productos fabricados.

En la ecología industrial también se interpreta la desmaterialización, como la disminución en el uso de materiales y energía en la producción industrial. El objetivo estaría en miniaturizar, para lograr productos con menor masa, y con una vida más larga. La ecología industrial se fundamenta en tres estrategias: La Gestión Medioambiental, Los Parques Industriales, y la Ecoeficiencia⁸, la cual está conformada por diversas herramientas, dentro de las cuales destaca el ecodiseño, también denominado como Diseño para el Ambiente (DfE por sus siglas en inglés).

Pauline Madge hace una crítica directa al carácter industrial del ecodiseño, al involucrarse con la ecología industrial, ya que la esquematización de modelos tecnológicos para analizar sistemas industriales o de producto, muestra la utilización de un enfoque totalmente *tecnocéntrico* (García Parra, 2008). En este sentido cómo podemos no optar por un enfoque tecnocéntrico, cuando uno de los soportes del mundo *superindustrializado* en el que vivimos es la tecnósfera, esta es la realidad, y sabemos que no la justifica el hecho de que este enfoque es el que nos ha puesto en la situación que cuestionamos. La realidad nos demuestra que no podemos simplemente ignorar la tecnósfera, lo cual requiere de una visión sistemática acerca del problema para analizar y recomendar estrategias viables.

Los diferentes autores presentan argumentos que atacan fuertemente el desarrollo de las sociedades contemporáneas, pero en muchos casos suponen cambios radicales dentro de un sistema fuertemente arraigado, lo cual impide que estos modelos teóricos se lleven a la práctica. Teniendo en cuenta las limitantes que presenta el sistema, es necesario proponer soluciones que sean coherentes con la problemática del medio ambiente en sus diferentes aspectos, y que puedan implementarse en la actualidad, para comenzar a cambiar la realidad. La desaparición del producto está lejos de ser una realidad, sin embargo su desmaterialización no implica necesariamente su desaparición, sino que se puede reflejar en una disminución del uso de recursos y emisión de materiales, gases y energía a lo largo del ciclo de vida del producto.

¿Por qué diseñar nuevos materiales y objetos?

“Estamos llenado el mundo con tecnología y artefactos olvidando una pregunta importante ¿Para qué son estas cosas? ¿Qué valor agregan a nuestras vidas?” (Thackara, 2005).

La evidente materialización masiva pone en duda la necesidad de seguir creando materiales y productos, pero por otra parte existe la necesidad instintiva por modificar el medio ambiente para poder adaptarnos a él. Dentro de la idea de un desarrollo sustentable necesariamente tenemos que contemplar la dependencia material de las sociedades como una constante del desarrollo humano. El diseño de un mejor ambiente artificial surge como una problemática compleja, el desarrollo de nuevos materiales debe apuntar a conformar dicho ambiente, tanto de artefactos materiales como inmateriales que tengan características congruentes con lo necesario para lograr minimizar los impactos ambientales de nuestro desarrollo. No podemos negar nuestra dependencia material, pero si podemos modificar la manera en que esta se define. La idea de la

compartimiento ardiente donde enciende para calentar los tubos de la caldera. Las partículas más pesadas de la ceniza (ceniza de fondo o escoria) caen al fondo del compartimiento ardiente, mientras que las partículas más ligeras (cenizas volantes) siguen suspendidas en los humos (Jacinto Ambrocio, 2007).

⁸ Ecoeficiencia es un concepto que pretende servir de base para toda estrategia empresarial que busque ser compatible con los objetivos de la sociedad sustentable. El término fue introducido en la Cumbre de la Tierra de Río en 1992. Hacer más con menos, uso de menos energía, menos recursos y materiales para tener un menor impacto en el ecosistema (Yeang y Woo, Dictionary of Ecodesign, 2010). *El objetivo de la ecoeficiencia es intentar ofrecer a una mayoría de consumidores, bienes y servicios cuyo costo, a escala ecológica significativamente menor, sea abordable económicamente* (Viñolas, 2005, pág. 152).

desmaterialización nos puede orientar hacia un mejor aprovechamiento de los recursos que tenemos disponibles y la forma en que diseñamos y construimos nuestro ambiente artificial.

¿Representa la creación de nuevos materiales una posibilidad para lograr un menor impacto ambiental en nuestro desarrollo?

Surge la oportunidad de integrar el conocimiento de distintas disciplinas para desarrollar materiales con características y posibilidades de aplicación, que complementen los esfuerzos por lograr un desarrollo para la sustentabilidad. El desarrollo de materiales no debe limitarse únicamente a cumplir con las características técnicas para su funcionamiento correcto, es necesario considerar distintos factores que intervienen en su ciclo de vida, figurativamente desde que nacen, hasta que mueren. El aumento de la explotación masiva de los recursos naturales nos lleva a cuestionar nuestra dependencia hacia los materiales provenientes de los recursos no renovables, por lo que surge como necesario proponer alternativas para redescubrir los beneficios y oportunidades de los recursos renovables.

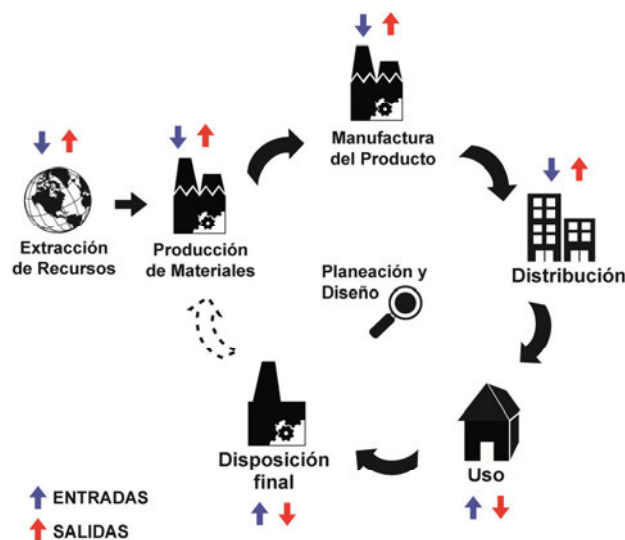
CAPÍTULO II

Aprovechamiento de Residuos para el Desarrollo de Materiales

2.1 El ciclo de vida de los materiales

Los materiales que utilizamos tienen un ciclo de vida, empieza en el momento de la extracción de los recursos para producirlos, hasta conformar los productos que fabricamos, usamos y desecharmos. El ciclo de vida de un material es una analogía a la forma en que los organismos existen en la naturaleza: nacen, se desarrollan, se reproducen y mueren. El concepto de ciclo de vida se ha trabajado desde la década de 1970, y es a partir de 1997 que toma más fuerza con la creación de la norma ISO 14040 y culmina en el 2002 con la Iniciativa del Ciclo de Vida lanzada por la Sociedad de Toxicología y Química del Medio Ambiente (SETAC, Society of Environmental Toxicology and Chemistry) y el Programa de las Naciones Unidas por el Medio Ambiente (PNUMA, 2004). El ciclo de vida será definido en relación a los procesos de intercambio de entrada y salida de materiales y energía entre el medio ambiente y toda la gama de procesos que componen el tiempo de vida de un producto (pudiendo ser un material, objeto, consumibles, etc.) proceso o servicio determinado, implicando que se deben analizar los flujos de energía, recursos consumidos y emisiones (Manzini y Vezzoli, 2008, pág. 55). Se pueden considerar las siguientes etapas en el ciclo de vida de un material:

Figura 7. Ciclo de vida de los materiales.



Fuente: Elaboración a partir de la información obtenida en (Ashby, 2009, pág. 41), (Manzini y Vezzoli, 2008, pág. 55).

Los límites del medio ambiente nos demuestran que ninguna actividad de diseño puede llevarse a cabo sin considerar el impacto que el producto tendrá en la naturaleza, y de manera más estricta hasta llegar a contemplar el impacto que tiene la actividad del diseño como parte del ciclo de vida del producto. La planeación y diseño es una etapa que normalmente no se considera por separado en las metodologías del análisis de ciclo de vida, pero es importante reconocerla como el motivo para llevar a cabo las otras etapas del ciclo (García Parra, 2008). En este sentido por diseño estamos contemplando la actividad realizada por un ingeniero, un carpintero, constructor, ingeniero químico, diseñador industrial, arquitecto, etc. Esta etapa se representa en el centro del esquema ya que aun cuando ocurra en distintos campos y niveles, se presenta como un factor presente durante todo el ciclo.

El ciclo de vida de los materiales esta relacionado con la manufactura de algún producto, pero también se considera a los materiales como productos, ya que se distribuyen para que las personas los utilicen directamente y tengan la posibilidad de transformarlos. El esquema del ciclo de vida de los materiales representa de manera general las etapas involucradas en el mismo (ver **Figura 7**), a cada etapa le corresponden ciertos impactos ambientales dependiendo del producto o proceso que se esté analizando. Cada impacto está basado en la afectación del intercambio de sustancias entre el medio ambiente y el sistema de producción y consumo. Estos efectos pueden ocurrir de dos formas (Manzini y Vezzoli, 2008):

- **Entrada:** Extrayendo sustancias del medio ambiente.
- **Salida:** Emitiendo sustancias al medio ambiente.

En todas las etapas del ciclo existen tanto la entrada de materia y energía, como la salida de emisiones sólidas, líquidas o gaseosas, así como de calor.

No todos los impactos ambientales son perjudiciales o igual de dañinos, algunos son globales y otros tienen presencia local. En la **Tabla 2** se enlistan los impactos ambientales que deben tomarse en cuenta en relación con los flujos de materiales, energía y emisiones.

Tabla 2. Impactos ambientales en relación a la entrada y salida de materiales, energía y emisiones.

ENTRADA	SALIDA
<p style="text-align: center;">Agotamiento de recursos</p> <p>Extracción desmedida de recursos materiales para la construcción del ambiente artificial.</p> <p>Efectos: Pérdida de capacidad de secuestro de dióxido de carbono por la deforestación, emisión de contaminantes al agua y al aire.</p>	<p style="text-align: center;">Calentamiento global</p> <p>Adición a la atmósfera de gases de efecto invernadero (dióxido de carbono, metano, clorofluorocarbonos y óxido de nitrógeno), por la quema de combustibles fósiles, ganadería, agricultura, y prácticas industriales. La tierra absorbe la radiación del sol. Parte de esta radiación es absorbida por gases presentes en la atmósfera.</p> <p>Efectos: Aumento en la temperatura de la atmósfera terrestre y de los océanos, aumenta la incidencia de tormentas, desertificación, cambio de las corrientes oceánicas, aumento del nivel del mar por el derretimiento de los polos.</p>
<p style="text-align: center;">Alteración de ecosistemas</p> <p>La intervención del ser humano en la naturaleza para obtener materia prima es altamente invasiva y produce cambios irreversibles en los ecosistemas. Causado principalmente por la deforestación, agricultura, minería, carreteras, crecimiento urbano, etc.</p> <p>Efectos: Causa principal de la pérdida de biodiversidad.</p>	<p style="text-align: center;">Destrucción de la capa de ozono</p> <p>Agotamiento del ozono estratosférico causado por la emisión de CFC (halón, tetracloruro de carbono, bromoclorometano, etc.).</p> <p>Efectos: Aumento de radiación UV, incrementando la incidencia de cáncer de piel, reducción de la productividad de las plantas y algas marinas.</p>
	<p style="text-align: center;">Eutrofización</p> <p>Aumento de nutrientes en el agua produciendo un aumento en la población de algas y por lo tanto una reducción de la cantidad de oxígeno.</p> <p>Efectos: Muerte de peces y otros organismos acuáticos.</p>
	<p style="text-align: center;">Acidificación</p> <p>La acidificación de la lluvia debido a emisiones de sulfuros, y otras sustancias a partir principalmente de la quema de combustibles fósiles.</p> <p>Efectos: Pérdida de la capacidad neutralizante del suelo y del agua, como consecuencia del retorno a la superficie de la tierra, en forma de ácidos, de los óxidos de azufre y nitrógeno descargados a la atmósfera.</p>
	<p style="text-align: center;">Emisiones tóxicas</p> <p>Exposición de las plantas, animales y otros organismos a sustancias tóxicas produciendo una serie de afectaciones.</p> <p>Efectos: Sustancias alérgicas – Afectaciones al sistema inmunológico, ataque a las células del tejido nervioso. Neurotoxinas – Atacan a las células del tejido nervioso. Toxinas mutagénicas – Causan anormalidades en el desarrollo y crecimiento del embrión. Cancerígenas – Crecimiento de células dañinas debido a anormalidades en el material genético, provocadas por el contacto con sustancias químicas.</p>
	<p style="text-align: center;">Acumulación de Residuos</p> <p>La producción de residuos en el sistema de producción y consumo se ha derivado en la acumulación de diversos materiales y emisión de sustancias.</p> <p>Efectos: Generación de contaminantes y gases de efecto invernadero por la descomposición de residuos orgánicos. Contaminación de suelo y agua por el contacto con los residuos y los líquidos que se pueden formar por el arrastre o filtrado de los materiales.</p>

Fuente: Design for Sustainability: Current Trends in Sustainable Product Design and Development (Garrette, Kosoris, Nguyen Hong, y Marcel, 2009, pág. 23).

Otros impactos ambientales pueden añadirse como el ruido, la contaminación electromagnética y genética, sin embargo a estos no se les ha estudiado y caracterizado correctamente, de manera que no son incluidos en esta lista. Los impactos ambientales ocurren en todas las etapas del ciclo de vida y deben ser considerados como un sistema, de forma que la afectación a una parte del mismo provoca una reacción en las demás partes, por lo que no puede darse por sentado que la mejora en una de las etapas de ciclo representará una disminución del impacto ambiental total, o si incluso afectará a que incremente el impacto en otra de las etapas (transferencia de impacto). El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una metodología que permite determinar los impactos ambientales durante la vida de un producto, proceso o servicio (ver **Anexo 13**. Análisis de Ciclo de Vida). La metodología del ACV se utiliza para cuantificar los impactos ambientales de forma integral para después hacer una interpretación y generar recomendaciones para disminuirlos. Es importante destacar la importancia del ACV como herramienta para evaluar los impactos ambientales de un producto o servicio, sin embargo en los alcances de esta investigación no se pretende abordar este tipo de análisis.

La idea de visualizar los flujos materiales como organismos vivos asemeja a la forma en que Ann Thorpe (2007), clasifica a los materiales, como si formaran parte del metabolismo natural, de esta forma los divide en “*nutrientes orgánicos*” y “*nutrientes técnicos*”. Esta clasificación es de carácter sistemática simplificando la organización en dos grandes grupos. Dentro de cada grupo podemos identificar las categorías convencionales que utiliza la Ciencia e Ingeniería de Materiales.

- **Nutrientes orgánicos:** Ladrillos, madera, fibras naturales como el yute, henequén, cáñamo de la india (kenaf), bambú, etc.
- **Nutrientes técnicos:** Metales, polímeros artificiales, vidrio, y otros materiales refinados como la cerámica y el cemento.

Los nutrientes orgánicos son generalmente materiales naturales que sin problemas se biodegradarán. Por biodegradación nos referimos a un proceso natural por el cual los químicos orgánicos en el medio ambiente son convertidos en compuestos más simples, mineralizados y redistribuidos a través de los ciclos elementales como el del carbono, nitrógeno y sulfuro. La biodegradación puede ocurrir solamente dentro de la biosfera⁹, ya que los microorganismos juegan un rol central en el proceso (Caroline, 2004). No se puede trivializar la biodegradación de los nutrientes técnicos, ya que tanto el tiempo como las condiciones varían de acuerdo al tipo de material. Los nutrientes técnicos deben permanecer en un ciclo metabólico industrial cerrado, porque son inadecuados para liberarse al medio ambiente. Esta clasificación no implica cambiar la denominación de los materiales, un polímero será siempre un polímero, lo cual se define por su estructura molecular, de manera general el argumento de Thorpe implica un cambio en la percepción del ciclo de vida de los materiales. No se pretende estigmatizar a los materiales que pertenecen a los nutrientes técnicos, sino destacar la importancia de llevar a cabo este ciclo de manera coherente con las características de cada tipo de material, por ejemplo un material tóxico que no puede liberarse al medio ambiente, implica su disposición final mediante un proceso específico para neutralizar las sustancias, para así lograr un ciclo metabólico industrial cerrado.

Existen algunas dificultades que se presentan al momento de adoptar esta clasificación, como por ejemplo la aparente pertenencia de algunos materiales al grupo de los nutrientes orgánicos, cuando en realidad no lo son, ya que en el procesamiento industrial se contaminan. Un ejemplo es el caso del algodón, podría hacerse de modo que su biodegradación ocurriera fácilmente, pero actualmente las prácticas de cultivo¹⁰, procesamiento, y acabado de los productos de algodón implican que no pueden biodegradarse de forma segura.

⁹ Conjunto de las tres zonas donde se desarrolla la vida animal y vegetal. Compuesta por la Atmósfera, Hidrósfera y Litósfera.

¹⁰ El cultivo del algodón representa el 25% del uso de insecticida y el 15% de uso de pesticida en el mundo, esto sólo para la producción de la materia prima (PopTech, 2011, pág. 6).

También está la cuestión de la renovabilidad, muchos nutrientes orgánicos son materiales naturales que son renovables dentro del lapso de tiempo de una vida humana. Algunos materiales son cultivados como productos agrícolas (algodón, cáñamo, bambú, etc.) y son rápidamente renovables de acuerdo a las temporadas, los árboles y productos forestales tienden a ser más lentos, del orden de décadas. Si el ritmo de consumo de la humanidad sigue siendo muy acelerado, ocasionará que la naturaleza no pueda equilibrar la pérdida de materiales, entonces el ciclo de vida de un nutriente orgánico no funcionaría. Para ambos grupos de nutrientes es necesario plantear una gestión pertinente con la capacidad de resiliencia de los ecosistemas que proveen los recursos renovables, así como la disponibilidad y reservas de los recursos no renovables.

El objetivo principal de la clasificación que hace Thorpe, es realinear los sistemas humanos con los naturales. La selección de materiales dentro del proceso de diseño debe darse a la tarea primordial de “cerrar” los ciclos en la dinámica de los flujos de materiales, y el uso de energía que implica cada selección, con el objetivo de la integración correcta a los ciclos metabólicos naturales. Los recursos renovables siguen siendo una opción atractiva para la construcción de nuestro ambiente artificial, pero su gestión es un punto esencial para determinar su impacto ambiental así como su correcta integración al ambiente. El ciclo de vida de los materiales emerge como un cuestionamiento esencial para el desarrollo de nuevas propuestas.

¿Cómo se puede disminuir el impacto ambiental durante el ciclo de vida de un material?

Las estrategias para el diseño de ciclo de vida tienen el potencial para guiar el desarrollo de materiales que ayuden a disminuir el impacto ambiental de los productos diseñados. Según Vezzoli y Manzini (2008) la disciplina que confronta los requerimientos ambientales de los productos industriales se llama *Diseño del Ciclo de Vida* (LCD, Life Cycle Design) este término está relacionado estrechamente con el diseño ecológico y el diseño para el ambiente (DfE, Design for the Environment). Vezzoli y Manzini proponen las siguientes estrategias, que también se consideran en la metodología DfE (Design for Environmental Sustainability, pág. 65):

- *Minimizar el consumo de materiales y energía.*
- *Elegir recursos y procesos de bajo impacto ambiental, así como materiales, procesos y fuentes energéticas con mayor compatibilidad ecológica.*
- *Optimizar el tiempo de vida del producto; diseñar productos durables e intensamente usables.*
- *Extender el tiempo de vida de los materiales; diseñar con el propósito de aumentar el valor de los materiales desechados por medio del reciclaje, compostaje o incineración.*
- *Facilitar el desensamblaje; diseñar con el objetivo de poder separar las partes o los materiales.*

Aun cuando estas estrategias están enfocadas hacia el diseño de productos, se considera pertinente su implementación en el desarrollo de materiales, ya que debe haber una coherencia con los objetivos del diseño. Podemos encontrar una clara relación con el término de ecoeficiencia que establece el aprovechamiento al máximo de la materia y la energía, así como el consumo mínimo de las mismas para satisfacer nuestras necesidades.

El enfoque “de la cuna a la cuna” de McDonough y Braungart (2002), propone un cambio importante de percepción hacia un ciclo de vida de los productos que sea continuo, implicando siempre un ciclo de transformación para aprovechar al máximo la materia y la energía. La forma en que se desarrollan los materiales no debe ser ajena a estas ideas, ya que como parte del ciclo de vida de un producto los materiales utilizados representan un impacto ambiental considerable, y prevalecen durante toda la vida del producto. En el campo de estudio de los materiales han surgido distintas propuestas en relación a los objetivos por disminuir el impacto ambiental del ciclo de vida de los productos. A estos materiales se les ha tratado de dar distintas denominaciones, lo cual nos lleva a cuestionar en específico la malinterpretación que implica el término de los materiales sustentables.

Materiales sustentables

¿Es correcto denominar un material como sustentable?

Retomando las definiciones, si la sustentabilidad afecta a la sociedad, cultura, economía y ambiente, sería necesario analizar los impactos ambientales de un material determinado en los cuatro pilares para argumentar esta denominación. Esta cuestión se presenta como una problemática compleja que no puede simplificarse al cuidado del medio ambiente y la rentabilidad económica. Podemos encontrar algunas contradicciones actuales respecto al uso del término material sustentable, por ejemplo en la base de materiales *Rematerialise*¹¹, se anuncia como una librería de materiales sustentables, sin embargo en la introducción de la página se argumenta: “*se ofrecen soluciones materiales innovadoras, que pueden tener un beneficio económico y menor impacto ambiental*”. Se afirma que sólo se está contemplando el pilar ambiental y económico, lo cual expone una visión incompleta de los objetivos del desarrollo sustentable, y una mayor relación con los objetivos del diseño ecológico por equilibrar la industria con el medio ambiente. No se descarta el papel de estos materiales como alternativas para buscar un desarrollo sustentable, pero no podemos transferir el peso de este término hacia los mismos, ya que sólo corresponden a un parte del sistema.

Para garantizar la disponibilidad de los recursos, los materiales que utilizamos deben provenir de la extracción de recursos renovables porque pueden crecer tan rápido como los utilizamos, o porque vuelven a su estado original al degradarse naturalmente, y lo hacen en un lapso de tiempo aceptable. Esto requiere que, el recurso y el material formen parte de un ciclo, como el del nitrógeno, carbono y ciclos hidrológicos del medio ambiente: son ciclos cerrados que operan de manera constante, reciclando elementos N, C y agua, de manera que los recursos sean constantes. No muchos materiales cumplen estas condiciones, los mejores ejemplos son la madera y las fibras naturales, pero aun así las prácticas durante todo el ciclo de vida, como el transporte, condiciones de trabajo, métodos de procesamiento, distribución, etc. determinan el impacto ambiental de los mismos. No existe ningún material utilizado por el ser humano que no dependa de la extracción de recursos ajenos al mismo, un ejemplo es el uso de gasolina para el transporte de la materia prima, o el transporte como tal, conformado por metales, plástico, circuitos, textiles, etc.

Las fibras naturales como el bambú y el cáñamo son ejemplos de plantas con un crecimiento adecuado para una gestión que busque la sustentabilidad, pero ¿Qué pasa con el espacio necesario para sembrar estas fibras si quisiéramos abastecer a toda la población? Una de las mayores causas de deforestación en el mundo es la tala para sembrar productos agrícolas. La mala gestión para la producción de estos supuestos “materiales sustentables”, puede tener consecuencias devastadoras para el medio ambiente, para hacernos conscientes de esto es necesario contemplar todos los impactos en las etapas del ciclo de vida de un material. Un claro ejemplo es la extracción de la madera, un material considerado como sustentable, sin embargo el transporte utilizado para trasladar los troncos a los aserraderos es altamente contaminante, por otra parte la mala gestión de los bosques se traduce en la deforestación y pérdida de biodiversidad. La renovabilidad no garantiza la sustentabilidad de un material.

Otra gran limitante a la denominación de un material como sustentable es el consumo de energía. Cualquier material depende del uso de energía durante todo su ciclo de vida, en su mayor parte la obtenemos de recursos no renovables, como los combustibles fósiles, lo cual implica una evidente contradicción con el objetivo a largo plazo de garantizar la disponibilidad de recursos para las futuras generaciones, ya que se agotarán en algún momento. Simplemente por la limitante energética se vuelve contradictoria la denominación.

¹¹ Kingston University (1994). *Rematerialise eco smart materiales*. The Sustainable Materials Library: <http://extranet.kingston.ac.uk/rematerialise/our-vision.htm>. Fecha de consulta (19/06/2012).

No se considera pertinente denominar a un material como sustentable sin un análisis que pueda argumentar esta postura. La denominación de los materiales no necesita un nuevo término para diferenciar a aquellas propuestas que tienen el objetivo de alcanzar un desarrollo sustentable, la distinción ocurre mediante la disminución del impacto ambiental durante todo el ciclo de vida de los mismos. Nos podemos referir a este tipo de materiales como aquellos que nos pueden ayudar a alcanzar un desarrollo sustentable, por ejemplo los materiales renovables, los materiales reciclados, etc. Para establecer un marco de referencia, es necesario revisar las diferentes maneras en que se clasifica a este tipo de materiales, para evitar confusiones en la terminología y unificar conceptos que se han utilizado en estudios antecedentes.

Ecomateriales

El término de ecomateriales fue propuesto en 1991 (Halada, Yamamoto), en Japón, a partir de la preocupación por los problemas ambientales en el mundo. En primera instancia se destacaron tres objetivos principales:

1. **Desempeño:** continuar con el desarrollo humano.
2. **Medio ambiente:** coexistencia con la naturaleza al minimizar el impacto ambiental.
3. **Conveniencia:** crear un estilo de vida en simbiosis con el mundo natural.

Estos puntos se enfocan en distinguir que los ecomateriales no deben ser considerados como tipos de materiales especiales con ciertas características y funciones peculiares, sino demostrar que todos los materiales deberían tener una tendencia a convertirse en ecomateriales. Los ecomateriales han sido definidos como aquellos que permiten obtener una mejora medioambiental en todo el ciclo de vida del producto, manteniendo una rentabilidad (Halada y Yamamoto, 2001). "*Los eco-materiales son aquellos que pueden contribuir a la reducción de la carga ambiental a través de sus ciclos de vida*" (Shionara, 2004, citado en Design for Sustainability a Global Guide Modules, 2009). Los ecomateriales juegan un papel esencial para minimizar los impactos ambientales, aumentar la reciclabilidad de los materiales y aumentar la eficiencia energética y material. Estos materiales también son llamados "materiales amigables con el ambiente", o "medioambientalmente preferentes", incluso "materiales verdes", denominaciones que se rechazan debido a su relación con posturas como la del "diseño verde", que ofrecen respuestas superficiales a los problemas ambientales.

En relación al diseño ecológico podemos encontrar recomendaciones para la selección de materiales destacando aquellas alternativas que se consideran adecuadas para implementarse en el proceso de diseño. Desde el año 1997, Brezet y Van Hemel argumentaban en la rueda estratégica para el ecodiseño (EcoDesign Strategy Wheel) la selección de materiales de bajo impacto ambiental en relación a las siguientes características:

- Materiales limpios.
- Materiales renovables.
- Materiales con energía inherente baja.
- Materiales reciclados.
- Materiales reciclables.

Sin hacer una referencia directa a los ecomateriales existe una relación con los argumentos para definir estas características ya que parten de un mismo interés: disminuir el impacto ambiental de los productos diseñados. De manera más específica Koichi Yagi (2002, citado en Delft University of Technology, 2009, pág. 123) argumenta que un ecomaterial debería presentar al menos una de diez propiedades superiores comparado con los materiales convencionales:

1. **Ahorro de energía:** reducir el consumo total de energía en el ciclo de vida de un sistema o artefacto.
2. **Ahorro de recursos:** reducir el consumo total de materiales en el ciclo de vida de un sistema o artefacto.
3. **Reusabilidad:** permitir el reuso del producto recolectado para funciones similares.
4. **Reciclabilidad:** permitir el reciclaje del material para usarlo como materia prima.
5. **Desempeño estructural:** las propiedades mecánicas deben permitir un uso óptimo del producto.
6. **Estabilidad química:** debe permitir usarlo durante el tiempo de vida útil sin que se degrade químicamente.
7. **Compatibilidad biológica:** capacidad de no tener efectos negativos en los ecosistemas.
8. **Capacidad para sustituir materiales nocivos.**
9. **Conveniencia:** asegurar la comodidad en el ambiente de trabajo.
10. **Capacidad de limpiar:** posibilidad de separar, reparar, remover y limpiar un agente contaminante para su tratamiento.

La propuesta de los ecomateriales surgió a raíz de la creación del concepto de ciclo de vida y el desarrollo de la metodología del ACV. Como generalmente los materiales forman parte de un producto, entonces podemos relacionarlos con posturas como el diseño para el medio ambiente (DfE), así como el diseño de ciclo de vida. De esta manera se puede afirmar que los ecomateriales son aquellos aptos para incluirse en el proceso del diseño de ciclo de vida de un producto.

En la **Tabla 3** se muestran algunos ejemplos de ecomateriales acorde a la clasificación hecha por la Universidad de Delft, (Design for Sustainability a Global Guide Modules, 2009). Este método de clasificación se basa en cuatro principios de sustentabilidad:

1. **Materiales cíclicos.**
2. **Materiales para la ecología y protección ambiental.**
3. **Materiales para la sociedad y la salud humana.**
4. **Materiales para la energía.**

Un ecomaterial no requiere de absolutos para serlo, puede cumplir con ciertas características y ser considerado como tal, lo cual refleja más la realidad, ya que una alternativa difícilmente puede cumplir con todas las propiedades. Algunos materiales pueden pertenecer a diferentes subcategorías a la vez, ya que por ejemplo los materiales renovables también pueden considerarse materiales fáciles de desechar o reciclarse.

Tabla 3. Categorías y subcategorías de los ecomateriales.

Categoría	Subcategoría	Ejemplos
1	A Materiales Reciclados	Eco-cemento, concreto de ceniza de carbón, cerámicos de residuos, plásticos reciclados, fertilizante de sílica, compuestos con fibras naturales recicladas.
1	B Materiales Renovables	Cerámicos de la madera, materiales a partir de madera, cerámica, plásticos biodegradables hechos a partir de bases vegetales.
1	C Materiales para la Eficiencia	Materiales que reducen los desperdicios, metales y aleaciones resistentes al agua, acero y aleaciones prepintadas.
2	A Materiales para el tratamiento de residuos	Membranas para la separación de gases de escape, resinas de intercambio de iones, enzimas microbianas, materiales absorbentes de grasa y aceite.
2	B Materiales para la reducción de la carga medioambiental	Catalizadores y materiales de membrana biológica para celdas de combustible, compuesto de fibra de carbono, materiales fotocatalizadores de recubrimiento para la construcción.
2	C Materiales fáciles de desechar o reciclarse	Plásticos biodegradables, material con clasificación funcional, colorbestos que reemplazan a los asbestos.
3	A Materiales libres de peligro	Soldadura libre de plomo, plásticos sin retardante de flama de halógeno, acero libre de cromo, adhesivo libre de COV, poliésteres sin metales pesados.
3	B Materiales para reducir los impactos en la salud humana	Lámina de acero que amortigua las vibraciones, paneles a prueba de sonido, recubrimientos antibacteriales, "crema de hueso" para cirugías ortopédicas y de cerebro.
4	A Materiales para la eficiencia energética	Acero ultra ligero, aleaciones de aluminio y magnesio de bajo peso, aleaciones para turbinas resistentes al calor, láminas de acero de alta inducción magnética, acero altamente endotérmico, fibras cromo fóbicas, película reflejante de calor para ahorro de energía casero.
4	B Materiales para la energía limpia	Silicón de alto grado para celdas solares, materiales para la conversión termoeléctrica, láminas de alta duración para baterías solares.

Fuente: (Delft University of Technology, 2009, pág. 125). Los ejemplos corresponden a eco-materiales actualmente comercializados en Japón.

COV – Compuestos orgánicos volátiles.

Colorbestos –láminas para techo libres de asbestos.

Es importante destacar que los ecomateriales no tienen que ser renovables o biodegradables para ser considerados como tal, por ejemplo en la categoría 4, en los materiales para la eficiencia energética, se incluye el acero ultraligero y las aleaciones de aluminio, los cuales provienen de recursos no renovables y no se biodegradan, pero por otra parte ayudan a disminuir el impacto ambiental y se pueden reciclar. Es necesario el uso eficiente de los recursos no renovables para producir materiales con las características para disminuir el impacto ambiental de los productos y no la estigmatización de este tipo de recursos, ya que dependemos de los mismos para producir muchas de las aplicaciones que utilizamos diariamente.

La Organización Asiática para la Productividad (APO) creó una base de datos acerca de los ecoproductos¹², dentro de los cuales se incluye a los ecomateriales, que son definidos como: “*materiales que poseen excelentes características, tienen buen desempeño, y pueden ser manufacturados, usados, reciclados o desechados teniendo un bajo impacto en el ambiente, así como ser benéficos para las personas*” (Asian Productivity Organization, 2012, pág. 29). Según la APO los ecomateriales deben cumplir con los siguientes criterios:

- *No deben utilizar recursos escasos.*
- *Deben tener funciones para limpiar y conservar el medio ambiente.*
- *Tener bajo impacto ambiental de manufactura.*
- *No contener ninguna sustancia dañina.*
- *Tener un buen desempeño al usarlos.*
- *Ser fáciles de reciclar.*

Estos criterios claramente se relacionan, tanto con las propiedades que menciona Yagi, como con las características enlistadas en la **Tabla 3**, ya que parten de la misma definición y se han dado a la tarea de complementarla para dar continuidad a esta línea de investigación. Esta concordancia ayuda a que se mantenga una coherencia en el uso del término ecomaterial y se evite la contaminación semántica.

El término de los biomateriales es asociado en algunos casos con los materiales para disminuir el impacto ambiental de los productos, un ejemplo lo podemos encontrar en la página en Internet Transmaterial¹³, donde se hace una recopilación de materiales en la que se incluye la clasificación de los Biomateriales, contemplando aquellos que se obtienen a partir de recursos renovables y aquellos en los que se usan sustancias que no son nocivas para el ambiente. En este caso se utiliza un término que normalmente se emplea para hacer referencia a “*materiales capaces de estar en contacto con tejidos vivos, durante un periodo de tiempo, como parte del tejido con el objetivo de completarlo o ayudar a su funcionamiento*” (Piña Barba, 2010, pág. 55), de esta manera se hace una mala adecuación del término, cuando en realidad los materiales referidos no tienen concordancia con la definición correcta de un biomaterial. No se descarta la validez de la información que se presenta en esta base de datos, pero no se deben ignorar desviaciones como esta, ya que sólo aportan confusión y distorsión de términos.

En otras fuentes se puede encontrar el término de materiales de base biológica (bio-based), aun cuando parezca que se trata de un sinónimo de los biomateriales, es un término más amplio que se refiere a aquellos materiales que provienen de la materia viva, lo cual puede incluir a la madera, las fibras naturales, los biopolímeros, los biomateriales etc. El grupo Poptech se refiere en específico a los materiales de base biológica como los generados a partir de la búsqueda de alternativas para reemplazar a los compuestos basados en sustancias petroquímicas, siendo un punto de particular interés para el campo de los ecomateriales (PopTech Ecomateriales Innovation Lab, 2011, pág. 18).

En la clasificación de los ecomateriales se contempla a los materiales de base biológica, pudiendo corresponder a la subcategoría de los materiales renovables. De igual manera ocurre con los biomateriales, que corresponden a la categoría 3 materiales para la sociedad y la salud humana. Existe una relación entre estos términos pero podemos notar que la clasificación de los ecomateriales es más amplia, los criterios y propiedades mencionados a su vez están relacionados con los objetivos de un sistema más complejo, como el diseño ecológico, el DfE, el diseño para la sustentabilidad, los ecomateriales por sí mismos no tienen ninguna utilidad, deben pertenecer a un

¹² Los ecoproductos son definidos por la APO como productos y servicios que cumplen con las regulaciones ambientales o son amigables con el medio ambiente, reflejando la preocupación de los fabricantes por el medio ambiente. Dentro de los ecoproductos encontramos cuatro categorías generales: materiales, componentes, productos y servicios (Asian Productivity Organization, 2012).

¹³ Esta página en Internet se creó a partir del libro Transmaterial (Brownell, 2012) en el cual no se utiliza la denominación de biomateriales.

sistema de interacciones donde tienen que responder a una necesidad, de manera general la construcción y modificación del ambiente artificial en el que vivimos.

La clasificación de los ecomateriales se presenta como un esfuerzo notable por unificar esta definición, ofreciendo la información más completa acerca de las diferentes características que pueden tener, lo cual no debe percibirse como una limitante, sino como un trabajo en desarrollo que puede complementarse. Las propiedades de los ecomateriales ayudan a orientar los objetivos para el desarrollo de un material, dependiendo del tipo y sus características podrá entrar en alguna de las categorías de esta clasificación. El desarrollo de materiales en general debería enfocarse en la disminución del impacto ambiental durante todo el ciclo de vida de los mismos, el objetivo no es adquirir una nueva denominación, sino lograr hacer materiales con propiedades adecuadas para encaminarnos hacia un desarrollo sustentable.

La extracción masiva de recursos naturales como aspecto esencial de la problemática material demanda mayor eficiencia en la forma en que aprovechamos los recursos que tenemos disponibles. Dependemos de una gran variedad de materiales cuya producción pretendemos que se justifique como un medio para alcanzar diferentes fines, sin importar los procesos involucrados durante el ciclo de vida y sus consecuencias. La extracción y producción masiva de recursos ha resultado de igual manera en el desecho masivo de residuos, los cuales se generan en las diferentes etapas del ciclo de vida de los productos y están conformados por una gran variedad de materiales. Antes de considerar el uso de materia prima virgen, es necesario contemplar el potencial de los recursos reciclados para el desarrollo de una propuesta.

2.2 Los residuos como materia prima

A lo largo de la historia hemos tratado los residuos como algo a eliminar en lugar de considerarlos una fuente de riqueza. Hemos tendido a acumularlos, dejar que la naturaleza los degrade, y una menor parte a tratar de reciclarlos o reutilizarlos. La materia es para nosotros un simple medio para obtener los servicios y funciones que requerimos de los productos, más que algo con un valor inherente. El procesamiento de cualquier material por medio de la implementación de energía, resulta en la reacción y así la transformación de esa materia para la creación de un producto útil, y un residuo. Cualquier tipo de material que esté generado por la actividad humana y que esté destinado a ser desechado lo denominamos residuo¹⁴, sin embargo el hecho de que los desechemos no implica que sean materiales inservibles.

Los residuos han sido ampliamente estudiados y clasificados, con el objetivo de identificarlos y establecer acciones adecuadas para su disposición final, la redefinición de los residuos no se relaciona con la clasificación de los mismos, sino con hacer énfasis en la importancia de su aprovechamiento. La revalorización de los residuos emerge como necesaria para enfatizar la importancia de hacer más eficiente el uso de la materia y la energía. Como argumenta Janis Birkeland, *“los residuos no son simples residuos. Todos los sistemas biológicos producen residuos, pero el residuo de un sistema puede ser valioso para otro”* (2002, pág. 43).

Retomemos un argumento antes formulado: Lo que entra en el sistema de producción y consumo son recursos naturales valiosos, produciéndose necesariamente residuos en las diferentes etapas del ciclo de vida de los productos y servicios, cuyo valor se determina por la factibilidad de su aprovechamiento. Todos los residuos tienen potencial para reutilizarse o convertirse en materia prima hasta que se demuestre lo contrario y se requiere de un método adecuado para su disposición final.

En relación con esta idea, Viñolas argumenta lo siguiente:

Debemos partir de la base de que todo residuo es potencialmente aprovechable simplemente por el hecho de que sea portador de materia y energía, las cuales son siempre por definición, valiosas. No existen otras limitaciones a este concepto que las que se derivan de nuestra falta de voluntad, ingenio o capacidad tecnológica para efectuar el reprocesamiento (Viñolas, 2005, pág. 74).

En ambos argumentos se destaca el potencial de los residuos para ser reciclados y dar continuidad al ciclo de vida de los materiales. Se fomenta un cambio de percepción de los residuos como materiales sin valor, hacia los residuos como materia prima. El concepto de ecoeficiencia refuerza esta idea, ya que promueve el máximo aprovechamiento de la materia y la energía, lo cual se encuentra en relación directa con el reciclaje de residuos como una de las principales acciones para lograrlo. El aprovechamiento de nuestros residuos es inminente para lograr una gestión más eficiente de los recursos que procesamos en la elaboración de materiales.

¹⁴ En la Ley para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos se define un residuo como: *“Material o producto cuyo propietario o poseedor desecha y que se encuentra en estado sólido, semisólido, es un líquido o gas contenido en recipientes o depósitos, y que puede ser susceptible de ser valorizado o requiere sujetarse a tratamiento o disposición final conforme a lo dispuesto en esta Ley y demás ordenamientos que de ella deriven”* (Congreso General de los Estados Unidos Mexicanos, 2012, pág. 6).

Reciclaje

El reciclaje no es un concepto nuevo para el ser humano, desde tiempos históricos reciclamos materiales, pero en relación al aumento de los problemas ambientales a partir de la década de 1960 (con el movimiento ecologista) se ha destacado su importancia como un factor fundamental para hacer más eficiente el uso de los recursos que tenemos disponibles. Una referencia importante es la iniciativa de las 3R (reducir, reutilizar y reciclar), propuesta en Japón en el 2005, en la cual se enfatiza la importancia de reducir el desperdicio, reutilizar y reciclar¹⁵ recursos y productos. Esta iniciativa implica la necesidad de modificar la configuración del modelo de economía industrial del S.XX, en el cual se asume que los recursos son ilimitados y que podemos producir y desechar sin importar las consecuencias. Se fomenta el cambio hacia un modelo industrial sustentable donde se busque el cierre de flujos de materiales y energía, así como la reducción de uso de recursos y el cambio en los patrones de consumo de nuestro estilo de vida (Mori, Hotta, y Hashi, 2012). El reciclaje se deja de percibir como una acción ecológica aislada, y más como parte de un sistema para encaminarnos hacia un desarrollo sustentable.

En relación al contexto de México, en la Ley para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos se define el reciclaje como: “*Transformación de los residuos a través de distintos procesos que permiten restituir su valor económico, evitando así su disposición final, siempre y cuando esta restitución favorezca un ahorro de energía y materias primas sin perjuicio para la salud, los ecosistemas o sus elementos.*” (Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, 2012, pág. 6). Es importante destacar que en esta definición, la restitución del valor económico de un residuo determina su potencial de reciclaje, no se considera una prioridad el ahorro de materia prima y energía (aunque debería de serlo), pero podemos notar que se menciona un vínculo importante entre ambos, si no se presenta el ahorro no es justificable el procesamiento de los residuos y la restitución económica.

Podemos identificar dos tipos generales de reciclaje, de ciclo cerrado y de ciclo abierto (Graedel y Allenby, 1996). En ambos tipos puede haber una pérdida de propiedades al reprocesar los materiales, pero esto no se puede generalizar, ya que cada material demuestra un comportamiento distinto. Cuando se recicla cualquier material existe una porción que no puede ser aprovechado porque no cumple con las características necesarias, pero también existe una merma o sobrantes de material durante el reprocesamiento.

- **Reciclaje de Ciclo Cerrado**

El reciclaje de ciclo cerrado implica un sistema donde los materiales recuperados de los residuos, se utilicen en lugar de materia prima para fabricar el mismo producto o componente para el que fueron usados en primera instancia. Teóricamente, el reciclaje de ciclo cerrado podría ser autocontenido por un periodo de tiempo determinado, sin requerir de materia prima, pero eventualmente se requiere de materia prima para compensar la pérdida de calidad y la merma en el proceso de producción. Este tipo de reciclaje puede facilitar el tratamiento de productos desechados, ya que generalmente el productor conoce mejor la configuración de los productos que se van a reciclar, se puede utilizar para materiales recuperados preconsumo y postconsumo.

- **Reciclaje de Ciclo Abierto**

El reciclaje de ciclo abierto recupera los residuos de una industria para producir un producto diferente al original (también llamado *reciclaje en cascada o reprocesamiento*). Es asociado comúnmente con los materiales postconsumo, pero la estructura también puede relacionarse con el reciclaje de materiales preconsumo, al tomar materiales desechados en el proceso de

¹⁵ La diferencia principal entre reciclaje y reutilización o reuso, es que para llevar a cabo el primero es necesario algún proceso de transformación.

producción y utilizarlos para fabricar otro producto. El reciclaje de ciclo abierto implica un cambio en las propiedades del material reciclado al adecuarlo para la producción de otro producto.

Para extender el tiempo de vida de los materiales, más allá del producto del que forman parte, Vezzoli y Manzini hacen referencia a una “reencarnación”, que se relaciona con los argumentos de la ecología industrial, en la cual no se considera la “muerte” del producto, sino una transformación continua de los materiales para conformar otros productos, hasta que las propiedades lo permitan. El concepto de metabolismo industrial, fomenta el flujo de materiales a través de los sistemas industriales para su transformación continua y posterior disposición como residuos. En relación a esto el concepto de *simbiosis industrial*¹⁶ propone el intercambio de materiales entre varios sistemas productivos de manera que el residuo de uno sea materia prima para otro (su implantación promueve una red de empresas). La simbiosis industrial plantea por lo general un reciclaje de ciclo abierto, en el cual los residuos sirven para producir un producto diferente al original. Estas ideas forman parte de la ecología industrial, la cual es más amplia, y contempla aspectos económicos, ambientales y sociales para tender a la sustentabilidad (Cervantes Torre-Marín, et al., 2009).

La relación del diseño ecológico con la ecología industrial ha sido criticada por aportar un carácter tecnocéntrico a la metodología, pero este argumento omite el reconocimiento de su importancia para encontrar un medio para equilibrar la industria con el medio ambiente que pueda llevarse a la práctica. Si idealizamos el concepto de diseño ecológico, estamos limitándonos a un enfoque meramente teórico, que va en contra de la realidad industrial de la actividad del diseño, así como muchas otras disciplinas con las que se relaciona. Esta realidad está implícita en la problemática que presenta el reciclaje de grandes cantidades de residuos, ya que implica contemplar necesariamente el uso de procesos industriales para transformar los materiales recuperados. Las ideas de la ecología industrial son coherentes con el objetivo de disminuir el impacto ambiental del ciclo de vida de un material, al fomentar el reciclaje de residuos como materia prima, nos recuerda que este es un aspecto esencial que debe ser considerado por todos los campos del conocimiento.

Materiales recuperados

Los materiales que pueden ser recuperados provienen de sobrantes o desechos del sistema de producción y consumo, estos materiales pueden reprocesarse para obtener recursos reciclados (o secundarios)¹⁷, o incinerarse para aprovechar su contenido energético (produciendo contaminación por la combustión de la materia orgánica). Cuando al residuo de una industria se aprovecha por un tercero, entonces se le llama subproducto al otorgarle una utilidad y un valor, más específicamente estos materiales pueden reprocesarse en dos etapas (Manzini y Vezzoli, 2008):

Preconsumo

Estos materiales son residuos provenientes de la extracción de recursos naturales, y la producción industrial. Los materiales de preconsumo se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Materiales desechados de una etapa específica de la producción industrial, que usualmente son reciclados dentro del mismo proceso.
- Materiales derivados de los desechos, residuos o excedentes que son generados en cualquier etapa de la producción original y son reciclados dentro o fuera del proceso.

¹⁶ El objetivo principal de la simbiosis industrial es económico, pero tiene consecuencias ambientales y sociales positivas (Cervantes Torre-Marín, et al., 2009).

¹⁷ Cuando los recursos secundarios se transforman en materia orgánica, y se usan como fertilizante natural, mezclándolo con tierra húmeda y otros residuos, se denomina compostaje (Manzini y Vezzoli, 2008, pág. 161) el cual se considera una forma de reciclaje.

Los materiales de preconsumo generalmente son limpios, fáciles de identificar y adaptables al reciclaje de alta calidad.

Podemos identificar a los siguientes tipos de materiales como residuos preconsumo:

- Industriales
- Minerales
- Forestales
- Agrícolas
- Ganaderos

Postconsumo

Estos materiales provienen del empaque y de los productos, una vez que fueron desechados por la persona que los usa. En algunos casos son de baja calidad y más difíciles de reciclar, como algunos materiales compuestos, pero también podemos encontrar materiales recuperados postconsumo de buena calidad como el aluminio, el PET, el acero, etc. los cuales tienen una buena capacidad para ser reciclados.

Podemos identificar a los siguientes tipos de residuo postconsumo:

Residuos sólidos urbanos¹⁸

- Productos de papel
- Textiles
- Plásticos
- Vidrio
- Metales
- Basura orgánica y madera

La variedad de residuos que encontramos en estos dos grupos requieren de distintos procesos para su recuperación y transformación para obtener materiales reciclados. Los materiales preconsumo presentan la ventaja de que generalmente son más limpios, fáciles de identificar y aptos para su reciclaje. Mientras que los materiales postconsumo tienden a estar mezclados con otros residuos, complicando la separación e implicando en algunos casos su contaminación y suciedad, lo cual dificulta el lavado de los materiales (Manzini y Vezzoli, 2008).

Para acotar el enfoque hacia un tipo de residuos, se consideran como prioridad los materiales recuperados que provienen de recursos renovables, para así poder garantizar la disponibilidad de los recursos en el futuro. Los materiales recuperados renovables pueden provenir tanto de la etapa preconsumo como postconsumo, implicando diferentes características y requerimientos para su reciclaje.

Residuos renovables

Existen materiales desechados a partir de recursos renovables que se les denomina como biomasa¹⁹. La biomasa ha sido apreciada principalmente por su potencial energético, tanto para la producción de combustibles, como la obtención de biogás y energía por su combustión (Iglesias Álvarez y Luna Antonio, 2009). La biomasa se puede clasificar de la siguiente manera:

¹⁸ Ver ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..

¹⁹ La biomasa se considera cualquier materia orgánica no fósil, particularmente materia celulósica y lignocelulósica, la cual proviene de recursos renovables. Incluye árboles, plantas, residuos del papel, fibra de planta, residuos forestales y agrícolas, residuos urbanos de madera, residuos de animales, etc. La biomasa incluye las cosechas de suelo y agua exclusivas para la obtención de energía, también conocidas como "*cultivos energéticos*" (Yeang, Ecodesign: a manual for ecological design, 2008, pág. 34).

- a) **Natural** – Producida en los ecosistemas naturales sin intervención del ser humano.
- b) **Residual** – Comprende distintos tipos de residuos industriales, urbanos, etc.
- c) **Cultivos energéticos** – Cultivos específicos para la obtención de energía, como especies leñosas, cultivos para producir etanol (p. ej. trigo, maíz, etc.) y cultivos para producir biodiesel (p. ej. girasol, lino oleaginoso, etc.).

Los materiales renovables desechados del sistema de producción y consumo corresponden a la biomasa de tipo residual, en la **Tabla 4** se presenta de manera general la gran variedad de materiales que se producen en distintos sectores:

Tabla 4. Fuentes de producción de biomasa residual.

Fuentes de Biomasa Residual	Tipo de Residuo	Características Físicas
Residuos agrícolas y forestales	Aserrío: corteza, aserrín, astillas.	Polvo, sólido, HR >50%.
	Ebanistería: aserrín, trozos, astillas	Polvo, sólido. HR 30 - 45%.
	Plantaciones: ramas, corteza, raíces.	Sólido, HR >55%.
Residuos ganaderos y agroindustriales	Cáscara y pulpa de frutas y vegetales.	Sólido, alto contenido de humedad.
	Cáscara y polvo de granos secos (arroz, café).	Polvo. HR <25%.
	Estiércol.	Sólido, alto contenido de humedad.
	Residuos de cosechas: tallos y hojas, cáscaras, maleza, pastura.	Sólido HR >55%.
Residuos industriales	Pulpa, cáscara y bagazo de frutas y vegetales.	Sólido, humedad moderada.
	Residuos de procesamiento de carnes.	Sólido, alto contenido de humedad.
	Aguas de lavado y de precocido de carnes y vegetales.	Líquido.
	Grasas y aceites vegetales.	Líquido, grasoso.
Residuos urbanos	Aguas negras.	Líquido.
	Desechos domésticos orgánicos (cáscaras de vegetales, huesos, cáscara de huevo, etc.).	Sólido, alto contenido de humedad.
	Basura orgánica (madera).	Sólido, alto contenido de humedad.

Fuente: Información obtenida de diversas fuentes (González Martínez, 2007) (Urbáez Méndez, Carballo Abreu, Arteaga Crespo, y Márquez Montesino, 2005, pág. 4).

HR – Contenido de humedad, relación del agua contenida por cada Kg de materia seca.

Este tipo de residuos tienen composiciones muy variables, lo cual puede implicar dificultades para su eliminación, así como la generación de un impacto ambiental considerable, por ejemplo la quema de residuos agrícolas y la emisión de contaminantes al aire. La variedad de materiales de la biomasa residual implican diferentes métodos para su reprocesamiento, así como complejidad tecnológica. Las características físicas y químicas de los diferentes tipos de residuos determinan su potencial para conformar materiales, por lo que sería necesario realizar pruebas específicas para determinar esto con certeza. Los residuos perecederos y de poca estabilidad en el ambiente presentan evidentes complicaciones para la elaboración de materiales, comúnmente estos desechos se destinan al compostaje para la obtención de abono orgánico.

Existen residuos con una composición lignocelulósica (como la madera) que han sido reciclados con anterioridad para la producción de materiales. Un ejemplo notable son los residuos recuperados de la industria forestal y del mueble, como aserrín y astillas, que han sido utilizados durante años para la fabricación de diversos productos como tableros enlistonados, aglomerados, de partícula, etc. (Fernández Rodríguez, 2000). También podemos encontrar fibras lignocelulósicas procedentes de los residuos agrícolas y agroindustriales, en México se produce una gran cantidad de biomasa que proviene de estos sectores, en los cuales se desecha bagazo, cáscaras, rastrojo, paja, etc. muchos de estos materiales son descartados cuando podrían tener potencial para conformar la materia prima para el desarrollo de un material.

Los residuos agrícolas y agroindustriales en México

Actualmente se producen distintos residuos agrícolas y agroindustriales en México que presentan potencial para conformar nuevos materiales a partir de recursos renovables. Los residuos agrícolas provienen de los restos de las plantas después de la cosecha, los residuos agroindustriales son aquellos que provienen de los procesos industriales al transformar los productos. En la **Tabla 5** se enlistan algunos tipos de los residuos agrícolas y agroindustriales que existen y su producción en un año determinado, esta información nos da una perspectiva general de la gran cantidad de materiales que tienen potencial para ser aprovechados.

Tabla 5. Ejemplos de residuos agrícolas y agroindustriales y su producción en México.

Categorías	Recurso Natural	Producto o desecho bruto con potencial energético	Año	Producción Agrícola (millones ton)
Subproductos Agrícolas	Caña de azúcar	Hojas y Puntas	2003	48.1
	Arroz		2000	0.3
	Cebada		2003	1.1
	Frijol		2000	1.4
	Maíz		2000	20.7
	Sorgo		2000	6.8
	Trigo		2000	20.7
Subproductos Agroindustriales	Caña de azúcar	Bagazo	2003	48.1
	Arroz	Cáscaras	2000	0.3
	Girasol		2002	155 x 10 ⁶
	Maíz	Elotes	2000	20.7
	Agave	Bagazo	2005	.17
Total				150.27

Fuente: (Estimación de los Recursos y Prospectiva Tecnológica de la Biomasa como Energético Renovable en México, 2005, pág. 23).

Agave: Calculado en relación con datos del procesamiento del *Agave tequilana*.

La cantidad de residuos reportada corresponde a un año de producción, si tomáramos en cuenta la producción histórica de este tipo de residuos, obtendríamos una gran cantidad de biomasa que no ha sido aprovechada, debido a la falta de la diversificación de sus usos y la cantidad masiva de residuos producidos. El manejo de grandes cantidades de residuos orgánicos llega a representar un problema para las empresas que los producen, algunos usos que se les ha dado va desde la combustión para la obtención de energía, sustrato de cultivo, alimento para ganado, extracción de aceites y sustancias, relleno, compostaje, etc. Aun así el volumen producido supera estos esfuerzos, y sigue habiendo una gran cantidad de materiales que presentan la oportunidad para diversificar sus aplicaciones.

Los residuos de materiales renovables no están exentos de producir un impacto ambiental, la cuestión está en determinar qué proporción del impacto ambiental generado por el proceso primario debe asumirse por el aprovechamiento del residuo. Si lo analizamos de forma sistemática, si no existe un cultivo y la producción, no existiría el residuo. Podríamos asignar una parte del impacto ambiental correspondiente a la cantidad de material virgen que entra, y la cantidad de residuo que sale. La cantidad de residuos producidos equivalen a una parte del impacto ambiental del cultivo, uso de suelo, fertilizantes, agua, emisiones, impacto social, etc., a esto se le añade el impacto por el reprocesamiento de los residuos para poder utilizarlos como materia prima (dependiendo del tipo de material). No debemos mitificar a este tipo de materiales, lo importante es ser conscientes de los procesos involucrados en cada etapa del ciclo de vida de los mismos.

2.3 Residuos agroindustriales del Agave tequilana

Dentro de los diversos residuos agrícolas y agroindustriales generados en México encontramos la situación del *Agave tequilana* y la producción de tequila, como el caso de una agroindustria donde se presenta la oportunidad para reciclar un residuo (preconsumo) en grandes cantidades, a partir de un recurso renovable. Con el paso del tiempo grandes cantidades de bagazo se siguen desechando, en lugar de aprovecharse su potencial como materia prima para distintos usos, entre ellos la elaboración de materiales.

El agave

En México el agave ha sido una planta representativa de la cultura y la sociedad, el valor que se le da ha cambiado a lo largo de la historia, pasando de planta sagrada en el pasado,²⁰ a producto agrícola para el sustento económico de diferentes regiones en la actualidad. El agave se diversifica en diferentes especies de las cuales se obtienen distintos productos y subproductos.

El agave tequilero pertenece a la familia botánica de las Agaváceas. Esta familia de plantas es endémica del continente americano y se distribuye desde el sur de Canadá, México, Centroamérica, norte de Sudamérica e islas del Caribe. La familia Agavaceae puede estar representada por dos subfamilias, la de las yucas (*Yuccoideae*) y la de los agaves (*Agavoideae*). La mayor riqueza y diversidad de agaváceas se encuentran en México, ya que el 75% de sus variedades botánicas (especies, subespecies, variedades y formas), están representadas en nuestro país (Valenzuela Zapata, El Agave Tequilero Cultivo e Industria en México, 2003, pág. 27) s. El género *Agave* es el más representativo y diverso, actualmente se reconocen 136 especies, 26 subespecies, 29 variedades, y 7 formas para la parte de Norteamérica. El nombre agave proviene del griego *agavos* que significa admirable. Este nombre fue elegido por Carl von Linné, un naturalista sueco, que describió el género a partir de la especie *Agave americana* en el año 1753 (Valenzuela Zapata, El Agave Tequilero Cultivo e Industria en México, 2003, pág. 31).. El género *Agave* se divide en dos subgéneros: *Agave*, con inflorescencia en panícula o umbelada, y *Litsea* en forma de espiga o racimosa

Los agaves se distribuyen en todo el continente, de manera silvestre o cultivada, se presentan y desarrollan mejor en ambientes áridos y semi secos aunque también, como ornamento, se adaptan a ambientes templados y húmedos.

Agave tequilana

El *Agave tequilana* es una especie que pertenece al subgénero *Agave* dentro del grupo *Rigidae*, de acuerdo con la distribución propuesta por Howard Gentry²¹ (1982) citado por (Valenzuela Zapata, El Agave Tequilero Cultivo e Industria en México, 2003, pág. 32) La planta *Agave tequilana* Weber variedad azul, es una planta carnosa en forma de roseta, fibrosa, de color azul o verde grisáceo, originado por un alto contenido de ceras que impiden que la planta pierda agua. Sus hojas son rígidas, con espinas laterales, también llamadas marginales y apicales (**Figura 8**); almacena inulina²² en el tallo y es productora de fructuosa. De este agave se obtiene la bebida denominada Tequila. Las plantas pueden alcanzar una altura de 1.70 a 2m, y 1.5m de ancho,

²⁰ Los agaves pulqueros del centro de México eran asociados con el mito de Mayahuel (diosa del maguey pulquero) el cual en realidad no está relacionado con los agaves mezcaleros del occidente de México (Valenzuela Zapata y Gaytán, La Jornada en la ciencia).

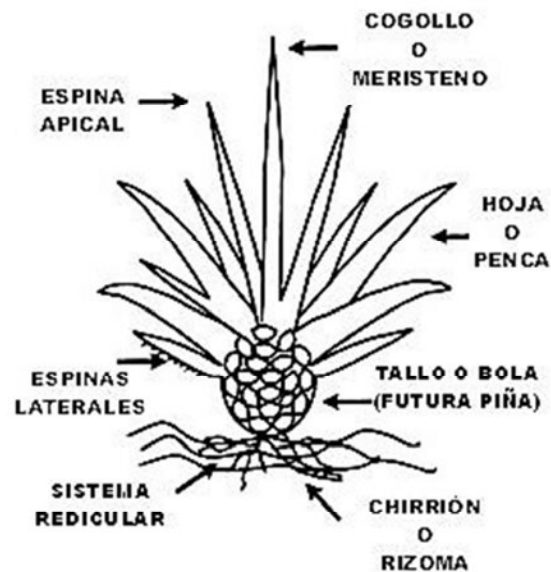
²¹ El Dr. Howard Scott Gentry es investigador del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América, es quien realiza la obra más importante en la actualidad acerca de la taxonomía de agaves en Norteamérica.

²² La inulina es un carbohidrato no digerible que está presente en muchos vegetales, frutas y cereales. La inulina y sus derivados (oligofructosa, fructooligosacáridos) son generalmente llamados fructanos, que están constituidos básicamente por cadenas lineales de fructosa (Madrigal & Sangronis, 2007).

decreciendo significativamente en tamaño cuando florecen. Las plantas tienen hojas en su mayoría de 90 a 120 cm de largo, y de 8 a 12 cm de ancho.

La reproducción de este agave se puede dar por semilla o bulbillo, los cuales, en razón de producciones industriales no son utilizados. El agave, tarda de ocho a diez años en obtener su madurez, durante los que se le debe dar mantenimiento; limpieza del terreno, fertilización, control de crecimiento y prevención de enfermedades (Academia Mexicana del Tequila, A.C. información disponible en línea: <<http://www.acamextequila.com.mx/amt3/elagave.html>>).

Figura 8. Anatomía del agave.



Fuente: Academia Mexicana del Tequila A.C., 2012. (Disponible en línea: <<http://www.acamextequila.com.mx/amt3/elagave.html>>).

Figura 9. Sembradío de *Agave tequilana* Weber variedad Azul.



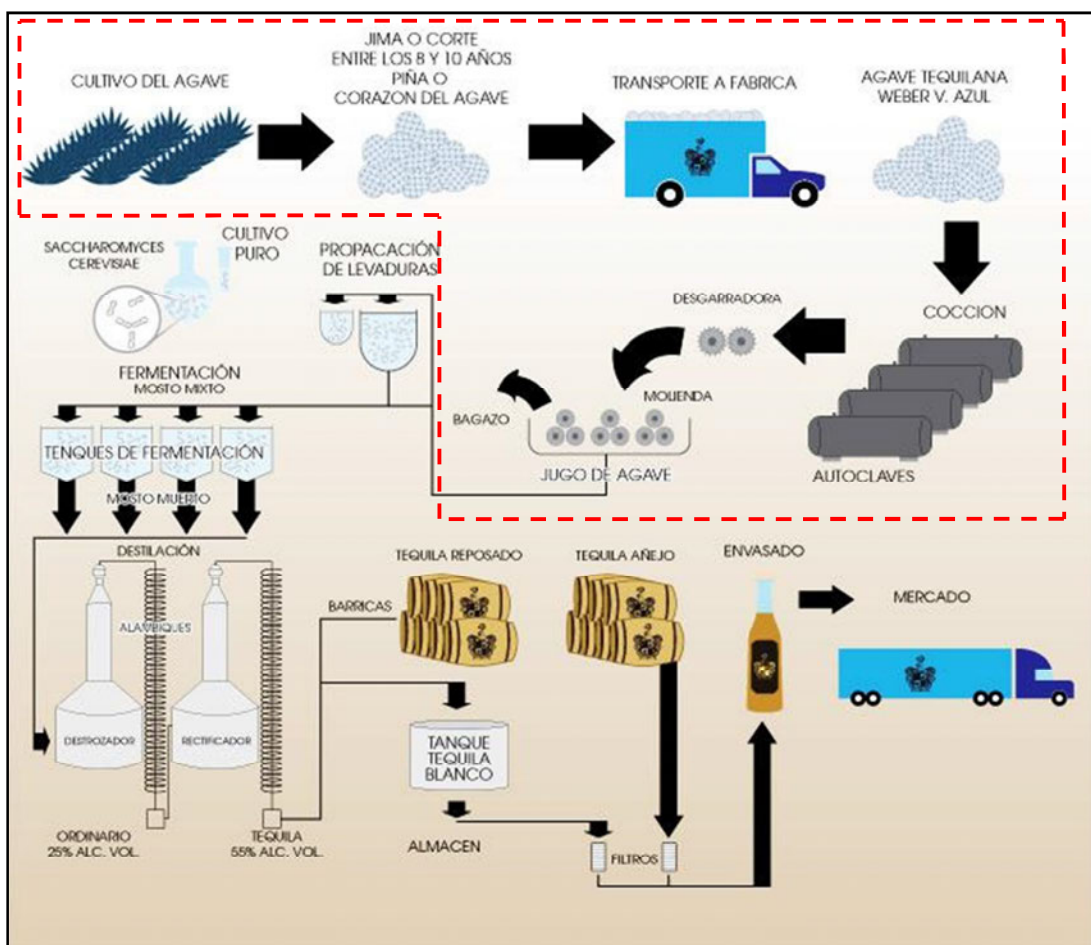
Fuente: (Agave para la producción de biocombustibles, 2011).

Producción de bagazo

Este desecho es la fibra residual que queda después de cocinar, moler y extraer el jugo fermentable de la piña del *Agave tequilana Weber* variedad azul. La producción de bagazo es equivalente al 40% del peso de las cabezas de agave molidas según Cedeño, (1995). Al respecto Soto Velasco (1989) citado por (Valenzuela Zapata, El Agave Tequilero Cultivo e Industria en México, 2003, pág. 155) nos dice que entre 55 y 60 kilogramos de bagazo son desechados en la producción de 1 litro de tequila. Estos datos se toman como una referencia ya que las cantidades pueden ser variables dependiendo del tipo de tequila que se produzca. En el 2005 se cosecharon en Jalisco, 688,800 toneladas de agave, se concluye que sólo en ese año se dejaron de aprovechar 275,520 toneladas de bagazo (Consejo Regulador del Tequila, 2012). En la mayoría de los casos estos residuos se ha utilizado para la fabricación de ladrillos, colchones, etc. pero para los grandes volúmenes que se producen, estas alternativas no representan un impacto importante en la utilización de este material (Iñiguez, Acosta, y Martinez, 2006).

La generación de residuos agroindustriales en la producción del tequila surge como una oportunidad para aprovechar un material reciclado proveniente de un recurso renovable. En la **Figura 10** se presenta el esquema de la producción del tequila de una empresa productora, que permite identificar la etapa en la que se produce el bagazo, al moler las piñas de agave para extraer el jugo.

Figura 10. Proceso de producción de tequila.



Fuente: Proceso de producción de tequila de la empresa Tequilas del Señor Destilería Río de Plata®. (Disponible en línea: <<http://www.tequilasdelsenor.com.mx/pages/infraestructura.html>>).

Este diagrama también indica que los procesos para generar estos residuos presentan entradas y salidas de materias primas y energía, así como emisiones que implican un impacto ambiental, que como se mencionaba anteriormente, se tendría que hacer una asignación del impacto ambiental en relación al peso total de las piñas de agave que entran en el proceso y la masa de bagazo producido. El ciclo de la producción de bagazo implica desde el cultivo del agave, hasta la molienda de las piñas cocidas para extraer los jugos para la fermentación. En años recientes las empresas tequileras más grandes han optado por un proceso de compostaje para deshacerse de este residuo, lo cual provoca la emisión de dióxido de carbono y metano. En algún momento la fibra del bagazo tiene que degradarse, pero es posible darle otros usos al bagazo, y extender su "tiempo de vida" antes de hacer esta disposición final.

Figura 11. Piñas de agave tequilero.



Fuente: Sandra Stimson, *SXC Free Stock Photography* (disponible en línea: <<http://www.sxc.hu>>).

Figura 12. Bagazo de la producción del tequila.

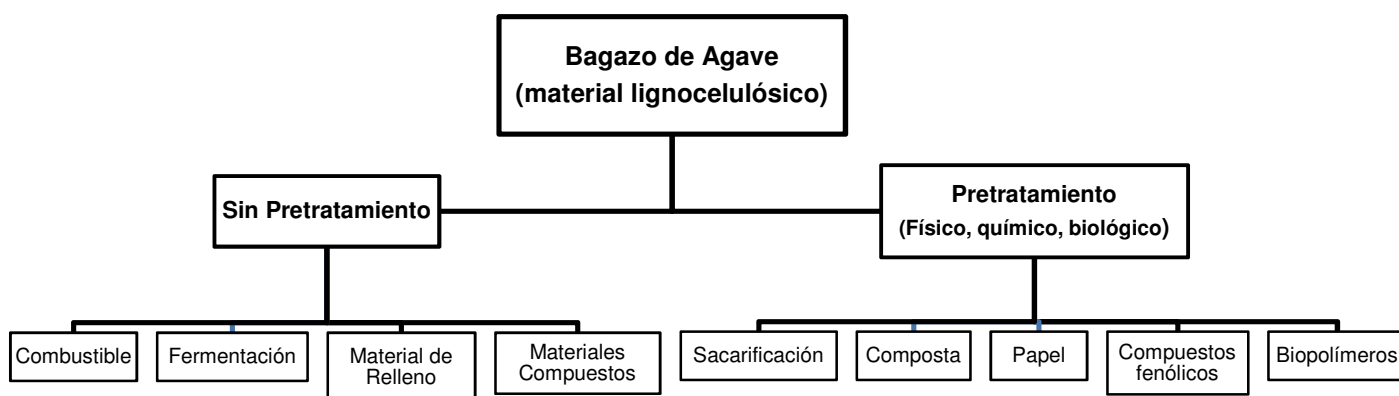


Fuente: Fábrica de ladrillos para combustión de bagazo de agave, Amatitlán, 2010.

Algunos de los usos que se le ha intentado dar al bagazo de agave son: combustible para hornos, fabricación de papel, materiales aglomerados, substrato para cultivo de hongos comestibles, etc. También se han realizado diversas investigaciones para evaluar los usos potenciales del bagazo, algunos están en desarrollo y otros ya se han experimentado, en la **Figura 13** se muestra una forma de clasificarlos.

Aun cuando encontramos estas alternativas para aprovechar los residuos, actualmente no se cuenta con suficientes procesos en la industria para disponer de todo el bagazo producido. En relación al campo de los materiales, los compuestos reforzados con fibras naturales han sido objeto de estudio desde hace varios años, el aprovechamiento de residuos con esta finalidad presenta la ventaja de disminuir el costo del producto final y cumplir el objetivo de aprovechar un residuo. Es importante destacar que el bagazo del agave sin pretratamiento, evita el uso de sustancias y procesos, que contribuyen a los impactos ambientales en el ciclo de vida del producto final.

Figura 13. Usos comunes y potenciales del bagazo de agave.



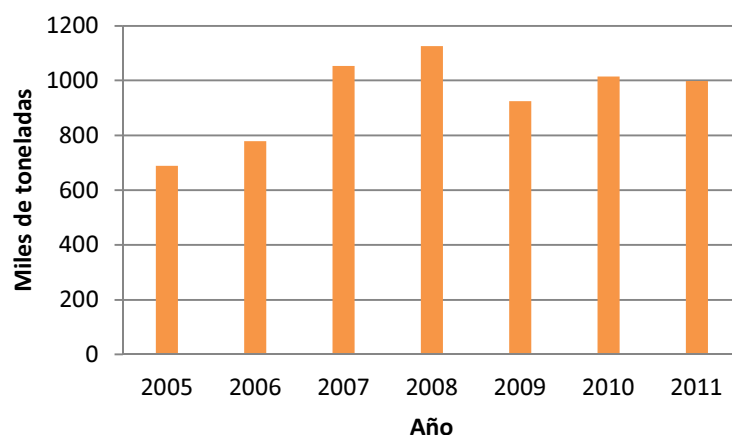
Fuente: Adaptado de (González García, González Reynoso, y Nungaray Arellano, 2005, pág. 5)

Consumo de agave

El consumo de agave para la producción de tequila²³ (ver **Anexo 9.** Producción de Tequila) ha aumentado desde el año 2005, alcanzando su cifra más alta en el 2008 con 1, 015,100 toneladas de agave tanto para la producción de tequila, como tequila 100% puro de agave. En la **Figura 14** podemos apreciar una disminución del consumo hacia el año 2009, pero un realce y estabilización en el año 2010 y 2011. Estas cifras nos indican que la siembra de agave sigue siendo sustancial sin una tendencia clara a la escasez, lo cual implica una constante producción de bagazo. En el año 2011 se produjeron aproximadamente 399,360 toneladas de bagazo.

²³ El tequila se clasifica en dos tipos en relación a su elaboración: tequila 100% de agave, es en el que se usan únicamente los azúcares del Agave tequilana Weber variedad azul para su producción. El tequila es al que se le añade hasta un 49% de otros azúcares que no son de agave como glucosa, piloncillo o sacarosa (Bautista Justo, Barboza corona, y Parra Negrete, 2001).

Figura 14. Consumo total de agave para Tequila y Tequila 100% de agave.



Fuente: (Consejo Regulador del Tequila, 2012).

El mercado del agave para la producción de tequila ha sufrido distintas afectaciones con el paso del tiempo, desde el año 2005 los productores no vinculados con las empresas tequileras no pudieron comprometer la totalidad de sus cosechas²⁴, ya que las grandes casas productoras tenían sus necesidades de agave cubiertas con producción propia o contratos de aparcería²⁵. No fue posible encontrar un registro de la cantidad de plantas que pudieron venderse y aprovecharse, lo cual puede implicar que se hayan desperdiciado grandes cantidades de agave. Situaciones como esta representan una oportunidad para otros sectores que podrían aprovechar esta materia orgánica para la producción de productos distintos al tequila. En este sentido desde el año 2005, el gobierno federal y estatal recurrió a la apertura de cuatro plantas productoras de miel de agave y de inulina para enfrentar la sobreproducción de agave, se ubican tres en Jalisco y una en Michoacán. Sin embargo este esfuerzo sólo ayudó a absorber una parte de las cosechas. Se aprecia que en el 2009 hubo una caída en la producción de agave, la cual se estabiliza a partir del 2010. En el año 2011 se reportó que la etapa de sobreproducción del agave tequilero había terminado, lo cual implica mejores condiciones para los productores de agave al aumentar el precio del mismo. En el inicio del año 2012 no se registra un cambio radical en el consumo de agave, lo cual habla de una situación similar a la del año 2011. En la **Tabla 6** se presenta el consumo de agave registrado para el primer trimestre del 2012.

Tabla 6. Consumo de agave y producción de bagazo en el primer trimestre 2012.

Tipo de tequila	Consumo de Agave (ton)	Producción de Bagazo (ton)
Tequila	89,200	35,680
Tequila 100% agave	149,900	59,960
Total	239,100	95,640

Fuente: (Consejo Regulador del Tequila, 2012).

²⁴ Se considera que en el 2008 el 60% de los productores de agave no encontró mercado para sus cosechas, estimando un excedente de 223 millones de plantas de diversas edades. Más de 30 millones de plantas presentaban signos de madurez extrema, lo cual requería de su cosecha para evitar pérdidas severas (Sectorial, 2008, pág. 3).

²⁵ *Contrato mixto, que participa del contrato de sociedad aplicado al arrendamiento de fincas rústicas, y que se celebra con gran variedad de pactos y costumbres supletorias entre el propietario y el cultivador de la tierra* (Real Academia Española, 2013).

Durante el lapso enero-marzo del 2011 se utilizaron en total 240,600 toneladas de agave, por lo que el consumo del año 2012 disminuyó 1%. Se utilizaron 149,900 toneladas de agave para producir la categoría Tequila 100 % de agave durante este primer trimestre. El consumo de agave para dicha categoría disminuyó 12.2% comparado con el 2011 cuando sumaron 170,700 toneladas. La categoría que sí registró un incremento en la utilización de materia prima fue la de tequila, pues procesó 89 mil 200 toneladas, aumentando 25.8% con relación al año pasado (70,900 toneladas) (Consejo Regulador del Tequila, 2012).

Únicamente en el primer trimestre del año 2012, se produjeron aproximadamente 95,640 toneladas de bagazo, representando una gran cantidad de material disponible para su aprovechamiento. El alto consumo de agave para la producción de tequila representa una constante generación de grandes cantidades bagazo, convirtiéndose en una fuente confiable de materia prima para el desarrollo de un material. Es importante mencionar que se procesan otros tipos de agave para producir mezcal, donde también se genera bagazo (*Agave fourcroydes*, *Agave americana*, etc.) lo cual implicaría la posibilidad de poder diversificar las fuentes de materia prima.

Procesamiento del bagazo

El bagazo obtenido del procesamiento de las piñas del agave no puede utilizarse directamente para la fabricación de materiales debido a su alto contenido de humedad y materia orgánica, por lo que se requiere de su reprocesamiento para obtener una materia prima adecuada para su reciclaje. Actualmente se puede identificar sólo una empresa²⁶ dedicada específicamente a la obtención de fibras duras a partir del reprocesamiento del bagazo de agave tequilero, pero es posible obtener este residuo por medio de otras fuentes, por ejemplo en el Estado de Jalisco existen más de 100 empresas registradas como Recolectores de Residuos de Manejo Especial²⁷, en un directorio que hizo la Secretaria de Medio Ambiente para el Desarrollo Sustentable en Octubre del 2011 (Martinez, 2011). Algunas de las empresas manejan bagazo de agave tequilero así como otros tipos de agave. De forma general para obtener fibras adecuadas para su uso se requiere someter al bagazo a los siguientes procesos:

- Triturado / Despulpado.
- Secado.
- Lavado.
- Molido.
- Tamizado.

La fibra que se obtiene presenta diferentes calidades dependiendo de su procedencia, ya sea de las pencas o de la piña del agave²⁸. La fibra del bagazo que se obtiene de la cocción y molienda de la piña del agave (**B**) es la de peor calidad y menor costo, presenta una longitud corta y color café, por lo que no cumple con las características óptimas para conformar textiles. La fibra a partir de las pencas desechadas en la jima del agave (**A**), es la que presenta mayor longitud y mejores propiedades, lo cual eleva su costo. En la **Tabla 7** se identifican los siguientes tipos de fibra de bagazo que se comercializan:

Tabla 7. Tipos de fibra de bagazo.

Clase	Descripción	Longitud	Calibre	Color
A	Fibra de bagazo	10cm máximo	.022mm	Café libre de nudos
B	Fibra de bagazo	10cm máximo	.022mm	Café

Fuente: Información obtenida de la página en Internet de la empresa Sol y Agave de Arandas S.A. de C.V.

La fibra de bagazo de piña de agave no presenta cualidades para conformar textiles de alta calidad, por lo que se propone su aprovechamiento para conformar la materia prima de un material biocompuesto. No se puede suponer que una sola alternativa de reciclaje sea la definitiva para aprovechar la gran cantidad de biomasa generada en esta agroindustria, es necesaria la diversificación de su uso para lograr un aprovechamiento sustancial de estos residuos.

²⁶ Sol y Agave de Arandas S.A. de C.V. ubicada en Arandas, Jalisco.

²⁷ Recuperado del Sistema de Información Estadística y Geográfica de Jalisco, 2012, disponible en línea: <<http://sieg.gob.mx/contenido/GeografiaMedioAmbiente/VTAREcolectoresRME.pdf>>.

²⁸ Las pencas son un residuo agrícola y el bagazo es un residuo agroindustrial.

2.4 Materiales biocompuestos para el aprovechamiento del bagazo de agave

La fibra obtenida del bagazo de agave no puede ser aprovechada por sí sola como un material para la elaboración de productos, más allá del uso que se le da para la elaboración de textiles, para lo cual este tipo de fibra no se presenta como óptima. Los materiales compuestos ofrecen la oportunidad de integrar distintas materias primas, lo cual permite complementar las características de la fibra al mezclarlo con otro material. Un material compuesto es un sistema integrado por una mezcla o combinación de dos o más micro o macroconstituyentes que difieren en forma y composición química, y que son esencialmente insolubles entre sí. La mayor parte de los materiales compuestos están formados por dos o más fases, una matriz continua que rodea a las demás fases, y un agente reforzante o fase dispersa que se clasifica en función de su microestructura o geometría. La matriz es responsable en su mayoría de las características físicas y químicas, transmitiendo los esfuerzos al agente reforzante y también protegiendo y dando cohesión al material. La microestructura del agente reforzante incluye la forma, tamaño, distribución y orientación de las partículas (Blank y Castelló, 2002).

El uso de biomasa para la elaboración de materiales corresponde a los primeros materiales compuestos elaborados por el hombre. Esto se puede rastrear al año 800 a.C. en Israel, así como en el año 3000 a.C. en Egipto, donde mezclaban arcilla y pasto o paja para reforzar ladrillos, después esta técnica fue utilizada por otras civilizaciones. El caso del papiro es similar, las fibras de caña de papiro se colocaron de manera paralela y perpendicular para formar capas y lograr fabricar el papel de papiro. En el año 108 a.C. se inventa el papel en China, el cual utilizaba un proceso similar (Umair, 2006, pág. 12). El potencial de la biomasa para conformar materiales ha sido explotado desde hace mucho tiempo, lo cual se ha diversificado en distintos tipos y aplicaciones.

Materiales biocompuestos

Se define a los biocompuestos como aquellos que se diseñan para tener el menor impacto ambiental posible. Son materiales compuestos completa, o parcialmente de elementos que provienen de recursos renovables, esta definición aplica para la fase de refuerzo y la matriz de unión (Caroline, 2004). De manera general los materiales biocompuestos son materiales compuestos hechos con fibras naturales y polímeros petroquímicos como el PP, PE, resinas epóxicas, o de biopolímeros como el ácido poliláctico (PLA) y polihidroxialcanoatos (PHA). Los materiales compuestos derivados de fibras artificiales, como la fibra de vidrio y de carbono, también se denominan biocompuestos. De esta manera este tipo de materiales pueden o no ser biodegradables. Las fibras naturales han adquirido importancia en este sentido ya que presentan buenas propiedades para actuar como agente de refuerzo dentro de los materiales biocompuestos y son biodegradables. A los biocompuestos derivados de biopolímeros y fibras naturales, también se les ha denominado como "*compuestos verdes*", en esta investigación se descarta el uso de esta denominación.

Los biocompuestos reforzados con fibras naturales demuestran excelentes propiedades mecánicas y térmicas, así como baja densidad. Por otra parte algunas desventajas son: su baja resistencia al agua, alta absorción de humedad, baja estabilidad dimensional, etc. las cuales deben solucionarse. Los biocompuestos tienen potencial para ser viables comercialmente para un mercado que demande grandes cantidades, la investigación en este campo es relativamente joven y se requiere darle mayor fomento para lograr mejores propiedades. En una investigación en la Universidad Anna en Chennai, India se destaca lo siguiente:

Aun cuando son biodegradables y competitivos en costo, los biocompuestos muestran propiedades térmicas y mecánicas inferiores e inviabilidades para aplicaciones que exigen un alto rendimiento. Por lo tanto los compuestos necesitan implementar tanto resinas procedentes de recursos naturales, así como químicamente sintéticas como intermediario para lograr biocompuestos apropiados para aplicaciones de alto rendimiento (Sithique y S., 2008, págs. 480-493).

Podemos encontrar en distintas investigaciones el interés por desarrollar biocompuestos con mejores propiedades con el objetivo de competir con los compuestos y materiales plásticos petroquímicos convencionales.

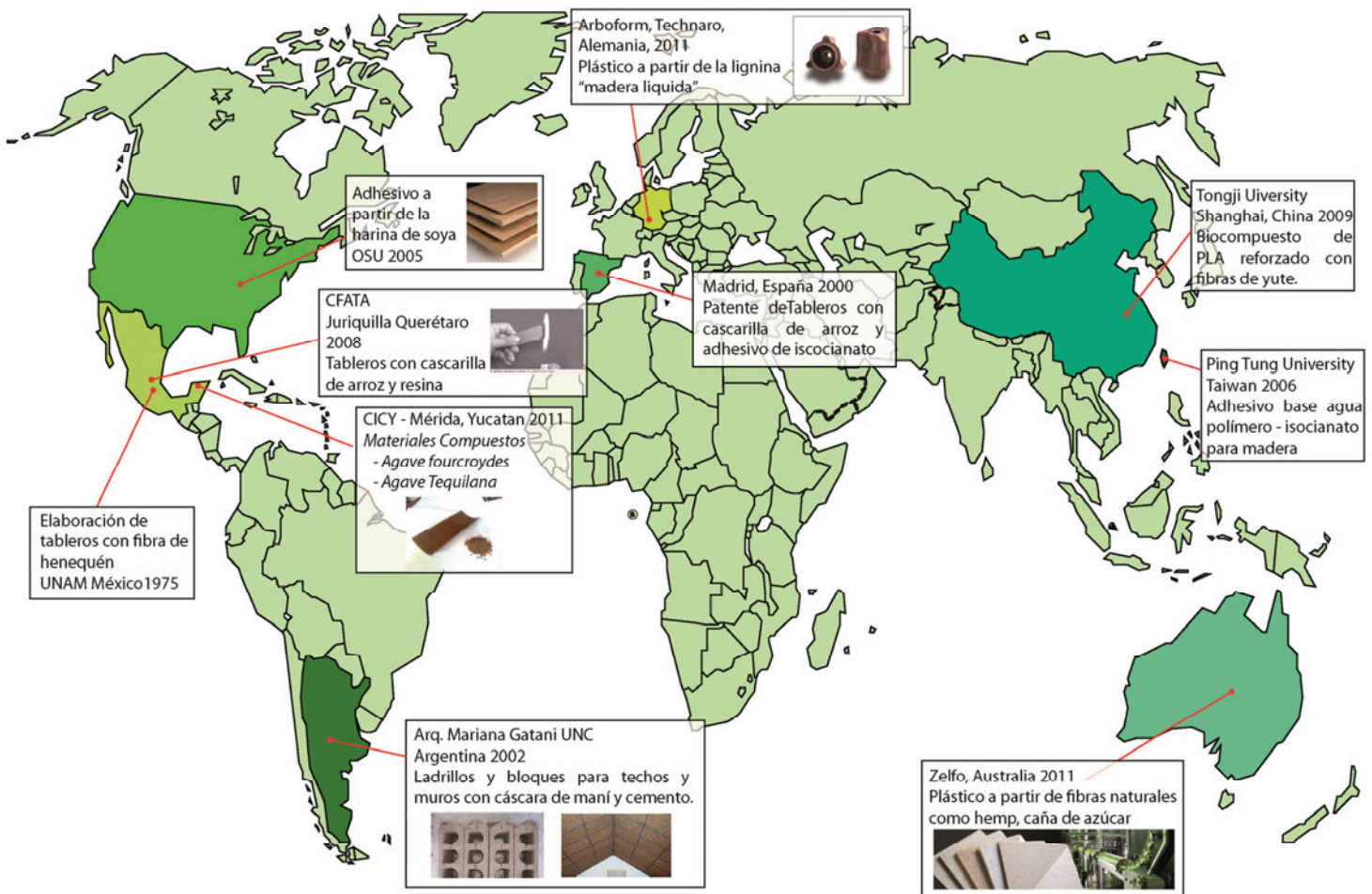
Biocompuestos reforzados con fibras naturales

El uso de los compuestos de plástico reforzados con fibras empezó en 1908 con las fibras de celulosa en los fenólicos (Mohanty, Misra, y Drzal, 2005). Con el paso del tiempo la implementación de las fibras naturales para reforzar compuestos se fue perfeccionando, en este sentido un punto de referencia importante lo podemos rastrear al año 1930 en Estados Unidos, donde se comienzan a fabricar compuestos utilizando fibras de vidrio cortas para reforzar el cemento (Owens Corning Fiberglass Company, 1935), para dar lugar a los compuestos reforzados con fibra de vidrio y poliésteres insaturados en 1940. Los compuestos fueron utilizados en la SGM, cuando los compuestos de fibra de vidrio y de resina poliéster se usaban para fabricar cascos de barcos y platos parabólicos para radares. El primer bote de fibra de vidrio fue fabricado por Basons Industries, sin embargo no se usó ningún agente desmoldante, así que no pudieron separar las piezas del molde. Durante la Segunda Guerra Mundial se lograron distintas mejoras en los compuestos, como nuevos métodos de manufactura como el hilado de filamentos, y aspersión, la implementación de estructuras de “sándwich” con núcleo celular, los compuestos resistentes al fuego y los materiales preimpregnados también fueron desarrollados en esa época. En 1950 por primera vez se utilizan compuestos en los automóviles para aprovechar sus propiedades; en 1968 fueron utilizados por primera vez en la construcción para la estructura de un domo en Benghazi. La aplicación de los materiales compuestos en la construcción se ha desarrollado notablemente y muchos sectores dependen de los mismos (Umair, 2006, pág. 12).

A partir de la década de 1990, los compuestos que integran fibras naturales emergieron como una alternativa prometedora para remplazar a los compuestos reforzados con fibra de vidrio en diversas aplicaciones, incluyendo paneles exteriores e interiores para la industria automotriz y aeroespacial (Mohanty, Misra, y Drzal, 2005). Los compuestos reforzados con fibras naturales como los de fibra de cáñamo–resina epóxica, Fibra de lino (flax)–polipropileno (PP), etc. son atractivos en estos sectores por su bajo costo y baja densidad. Los compuestos de fibras naturales también ofrecen ventajas medioambientales, como reducción de la dependencia de energía y fuentes de recursos no renovables, reducción de emisiones contaminantes, reducción de emisión de gases de efecto invernadero y al desecharlos existe la posibilidad de recuperar energía mediante incineración o integración al medio natural al poder biodegradarse (Joshi. et. al, 2004 citado en Environmental Impact Renewable Materials: Final Report, 2009).

De manera general se presenta en la **Figura 15** la ubicación geográfica de algunas investigaciones en el mundo acerca de materiales biocompuestos reforzados con fibras, así como adhesivos creados para tener un bajo impacto ambiental.

Figura 15. Antecedentes del desarrollo de materiales biocompuestos en el mundo, reciclado fibras naturales.



Fuente: Elaboración propia recopilando información acerca de antecedentes de materiales compuestos reforzados con fibras naturales.

Estos son sólo algunos antecedentes de materiales biocompuestos reforzados con fibras naturales, existen diversas investigaciones en los que se han aprovechado desde la fibra de coco (bonote), bagazo de caña de azúcar, lino, cascarilla de arroz, cáñamo, cáñamo de la india (kenaf), sisal, henequén, etc. para la fabricación de materiales que han demostrado diferentes comportamientos y propiedades. Los materiales biocompuestos reforzados con fibras naturales se han aplicado a diferentes sectores, en relación al mercado Norteamericano, dominan los productos para la construcción con un 74%, después el transporte con 16%, las aplicaciones industriales, para el consumidor un 6% y para infraestructura un 4% (Mohanty, Misra, y Drzal, 2005, pág. 249).

Existen en México antecedentes de investigaciones para el uso de la fibra de agave en la fabricación de materiales compuestos, por ejemplo en 1981 se realizó una tesis en la facultad de Química de la UNAM, para el desarrollo de tableros aglomerados usando fibras de henequén, donde se concluyó que el henequén tiene potencial para actuar como agente de refuerzo, con buenas propiedades de flexión en la experimentación y factibilidad económica para comercializar el producto (Sánchez Solís, 1981). En el Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY) desde hace varias décadas se ha investigado y experimentado con la fibra de henequén y de manera más reciente con la fibra de agave tequilero para la elaboración de materiales compuestos. En el

año 2006 se hicieron pruebas para la elaboración de compuestos de fibra de henequén y polipropileno (Balam Cocom, Duarte, y Canché). También se han elaborado tableros aglomerados con fibra de *Agave tequilana* (FAT) y un adhesivo de lignina, el cual podría extraerse del mismo bagazo de agave (Jiménez, 2012), así como materiales compuestos a partir de polipropileno y FAT (Quintal, 2012). Estas investigaciones demuestran la factibilidad de integración de las fibras de bagazo de agave como agente de refuerzo en un material biocompuesto, principalmente haciendo pruebas con polímeros petroquímicos como matriz de unión. La implementación de fibras residuales, como las del bagazo de agave en un biocompuesto permite la disminución de costos, obtención de menor peso y baja densidad.

Resinas y adhesivos

El uso de resinas y adhesivos son necesarios tanto para la unión de las partículas y fibras de cualquier material compuesto, como para mejorar las características del producto final, estas sustancias actúan como la matriz del compuesto. La problemática que se detecta es la emisión de contaminantes por la implementación de estas sustancias. Los adhesivos sintéticos como el fenol formaldehído y los isocianatos dominan el mercado de paneles estructurales hechos a base de madera, la materia prima que conforma estos adhesivos proviene del petróleo y el gas natural. Las matrices a partir de polímeros petroquímicos, implican la producción de materiales compuestos que en algunos casos se pueden reciclar, pero no se pueden biodegradar al final de su vida útil.

Existen distintos tipos de matrices que se pueden clasificar de la siguiente manera (Pickering, 2008):

- **Matrices termoplásticas** – Polímeros que se ablandan y derriten si se les calienta, llamados polímeros termoplásticos, consisten en cadenas moleculares lineales o ramificadas, teniendo unión intramolecular fuerte, pero unión intermolecular débil. El derretimiento y la solidificación de estos polímeros es reversible, y pueden volver a moldearse mediante la aplicación de calor y presión. Son semicristalinos o amorfos en estructura. Entre los ejemplos está el polietileno (PE), poliestireno (PS), nylon, policarbonato (PC), etc.
- **Matrices termofijas** – Los plásticos termofijos tienen una estructura entrecruzada, con enlaces covalentes entre todas las moléculas. No se ablandan pero se descomponen ante el aumento de temperatura. Una vez que han sido moldeados no se pueden volver a moldear. Ejemplos comunes serían, las resinas epóxicas, poliéster y fenol formaldehído.
- **Matrices de hule** – Las principales clases de compuestos de hule que se han utilizado son: hule natural (NR), hule estireno butadieno (SBR), hule butil (IIR), hules de poliuretano y hules de silicón. La matriz de hule más utilizada es la de hule natural.
- **Matrices biodegradables** – Diferentes tipos de matrices biodegradables están disponibles para usarse en biocompuestos, de origen natural y sintético.

Biopolímeros

Las matrices biodegradables ofrecen la posibilidad de conservar la biodegradabilidad de las fibras naturales, a este tipo de matriz también se le llama biopolímeros. Algunas matrices biodegradables presentan buenas propiedades mecánicas, con potencial para competir contra los polímeros de origen petroquímico que dominan el mercado.

A los polímeros derivados de recursos naturales se les pueden denominar como biopolímeros, también llamados polímeros biodegradables. La biodegradabilidad caracteriza a los biopolímeros, pero esta depende de diferentes factores que varían de acuerdo al tipo de recurso. Esta cualidad se ha aprovechado en la fabricación de empaques que tienen un ciclo de vida corto, sin embargo otras investigaciones sugieren la posibilidad de aplicación de los biopolímeros para producir materiales de larga duración y con buenas propiedades mecánicas (Caroline, 2004). El aumento de la demanda de biopolímeros indica que muchas empresas que producían plásticos petroquímicos están apostando a que en un futuro no muy lejano el costo de la materia prima para fabricar biopolímeros será mucho menor al del petróleo para fabricar plásticos termoplásticos y termofijos ya que se proyecta que comenzará la escasez de este recurso lo cual se verá reflejado en el precio de los polímeros petroquímicos (Centro Empresarial del Plástico, 2013). La sustitución de polímeros petroquímicos por los de origen natural se debe a los siguientes puntos de interés global:

- Transición al uso de energía a partir de recursos renovables.
- Menor costo de procesamiento de la materia prima.
- Reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero.
- Uso de menos agua.
- Reciclaje de Biomasa.
- Disminución de la acumulación de residuos sólidos.

Los estudios de análisis de ciclo de vida en relación a los impactos asociados a los biopolímeros en comparación con los plásticos petroquímicos, destacan que existe una reducción de distintos impactos ambientales en la producción de biopolímeros (T.H. Vink, R. Rábago, A. Glassner, y R. Gruber, 2003). Algunas empresas como Nature Works™ están desarrollando procesos para producir el biopolímero PLA a partir de residuos agrícolas en lugar de cosechas destinadas con este fin. Por otra parte pretenden enfocar sus requerimientos de energía a fuentes renovables como la energía eólica lo cual proyecta una disminución de distintos impactos ambientales (**Anexo 14. Impactos Ambientales en el Ciclo de Vida del PLA**).

Los polímeros biodegradables se pueden clasificar en cuatro familias según Bismark et al. citado por (Pickering, 2008). Actualmente podemos encontrar en el mercado distintos materiales biodegradables provenientes de los biopolímeros (**Tabla 9**), así como su mezcla con polímeros petroquímicos, consideramos pertinente el listado que se hace en el reporte "Biobased Packaging Material for the Food Industry". Estos productos presentan alternativas para actuar como la matriz de un biocompuesto reforzado con fibras, con la ventaja de estar disponibles comercialmente, será necesario evaluar las características y disponibilidad para hacer una selección.

El desarrollo de biopolímeros capaces de competir con los plásticos petroquímicos, ofrece la posibilidad de contrarrestar el problema de la acumulación de residuos plásticos a causa del desecho de productos de consumo. La biodegradación de los biopolímeros permite reintegrar los materiales a un ciclo natural al finalizar su tiempo de vida útil, y en el caso de los biopolímeros termoplásticos determina la opción de poder reciclarlos. Los biopolímeros también son atractivos por su producción a partir de recursos renovables, como el maíz. La obtención de mejores propiedades en los biopolímeros a hecho posible que los biocompuestos reforzados con fibras naturales puedan competir contra los biocompuestos que utilizan matrices petroquímicas.

Tabla 8. Clasificación de polímeros biodegradables.

NATURAL		SINTÉTICO		
Biomasa		Microorganismos	Biotecnología	Productos petroquímicos
Polisacáridos: celulosa	Proteínas y lípidos: albúmina caseína	Polihidroxicanoatos (PHA), ej. PHB Y PHVB.	Polilácticos, ej. PLA	Policaprolactona (PCL)
Almidones: trigo papa maíz	Animales: gelatina nata goma laca poliamidas			Poliesteramidas (PEA)
Productos lignocelulósicos: lignina celulosa	Plantas: soya gluten látex			Copoliésteres alifáticos, ej. PBSA
Pectinas: gomas quitosano				Copoliésteres aromáticos, ej. PBSA

Fuente: Adaptado de Properties and performance of natural fibre composites, 2008, pág. 427.

Tabla 9. Bioplásticos biodegradables actualmente en el mercado.

MATERIAL	FABRICANTE	NOMBRE COMERCIAL
Materiales biodegradables basados en recursos naturales renovables – Biopolímeros		
PHB Polihidroxibutirato	Was Monsanto	Biopol
	Biomer	Biomer
	Metabolix/ADM	Mirel
	Mitsubishi Gas	Biogreen
Acetato de Celulosa	Courtaulds	
	Mazzucchelli	Bioceta
PLA Poliácido láctico	Cargill Dow Polymers	NatureWorks PLA
	Mitsui	LACEA
	Hycail	/
	Galactic	Galactic
Almidón	National Starch	Eco-FOAM
	Avebe	Paragon
Materiales biodegradables basados en mezclas de biopolímeros y sintéticos		
Basados en almidón	Novamont	Master Bi
	Biotec	Bioplast
	Earth Shell	Earth Shell
	Biop	Biopar
	Kuo	Biorene

MATERIAL	FABRICANTE	NOMBRE COMERCIAL
Materiales biodegradables basados únicamente en sintéticos		
Copoliéster	BASF	Ecoflex
	Eastman	
	Chemical	Eastar Bio
Policaprolactona	Union Carbide	Tone polymer
Polibutileno succinato	Showa	
	Highpolymer	Bionolle
Poliesteramida	Bayer	BAK
Poliesteruretano	Bayer	MHP 9029
Copolímero de poliéster	Bayer	Degranil VPSP42002
Poliéster	Dupont	Biomax

Fuente: Información obtenida del reporte (Food Biopack Project, 2000).

Es necesario hacer énfasis en el método de disposición final de los biopolímeros biodegradables, ya que al ser desechados en un relleno sanitario pueden tener efectos negativos al dificultar su degradación y producir emisiones. El correcto compostaje de estos materiales cumple con el cierre del ciclo del carbono al producir composta para utilizarse en los cultivos. Los materiales biodegradables no resuelven los problemas ambientales por sí mismos, es necesario que pertenezcan a un sistema que busque los mismos objetivos.

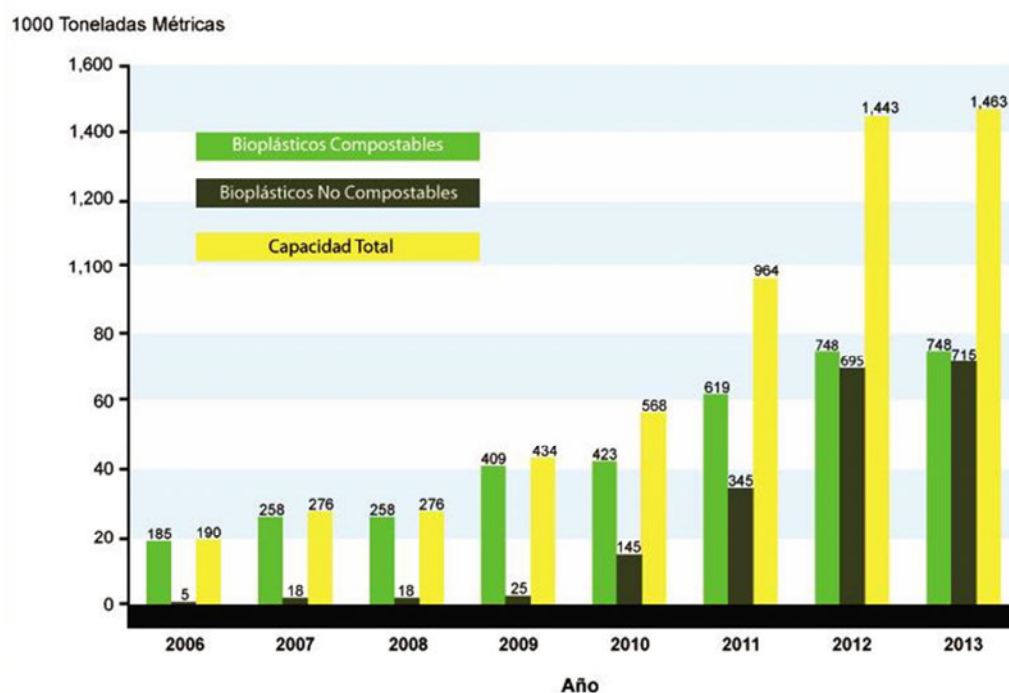
El aumento en la producción de los biopolímeros supone la necesidad de más tierras de cultivo para obtener la materia prima para su fabricación, lo cual ha llevado al cuestionamiento de esta actividad como un posible factor negativo para la producción de alimentos en el futuro.

Bioplásticos o alimentos

¿Puede contribuir la producción de bioplásticos a la crisis de alimentos?

Esta pregunta surge como esencial en relación al aumento en la demanda y la producción de biopolímeros para producir bioplásticos²⁹. Rotundamente el espacio de cultivo destinado para obtener materia prima para la producción de biopolímeros no puede amenazar la producción de recursos alimenticios, no necesitamos debatir la jerarquía entre ambos ya que es clara la diferencia en importancia. Por otra parte la deforestación para obtener más tierras de cultivo, sean para alimentos o no, es un problema al cual podría contribuir la producción de biopolímeros. Sabemos que no podemos permitir que esto suceda, sin embargo fomentamos el desarrollo de materiales renovables como los compuestos reforzados con fibras naturales como respuesta al deterioro ambiental. Si pretendemos que aumente el consumo de objetos fabricados con estos nuevos materiales, consecuentemente necesitamos un aumento considerable en la producción de los mismos, para lo cual se requerirá porciones considerables de tierra. No es suficiente con que provengan de recursos renovables, existen muchos factores involucrados con potencial para producir distintos impactos ambientales, por lo que se tiene que evaluar cuidadosamente la perspectiva que ofrecen los nuevos escenarios de consumo de los bioplásticos.

Figura 16. Capacidad mundial de producción de biopolímeros.



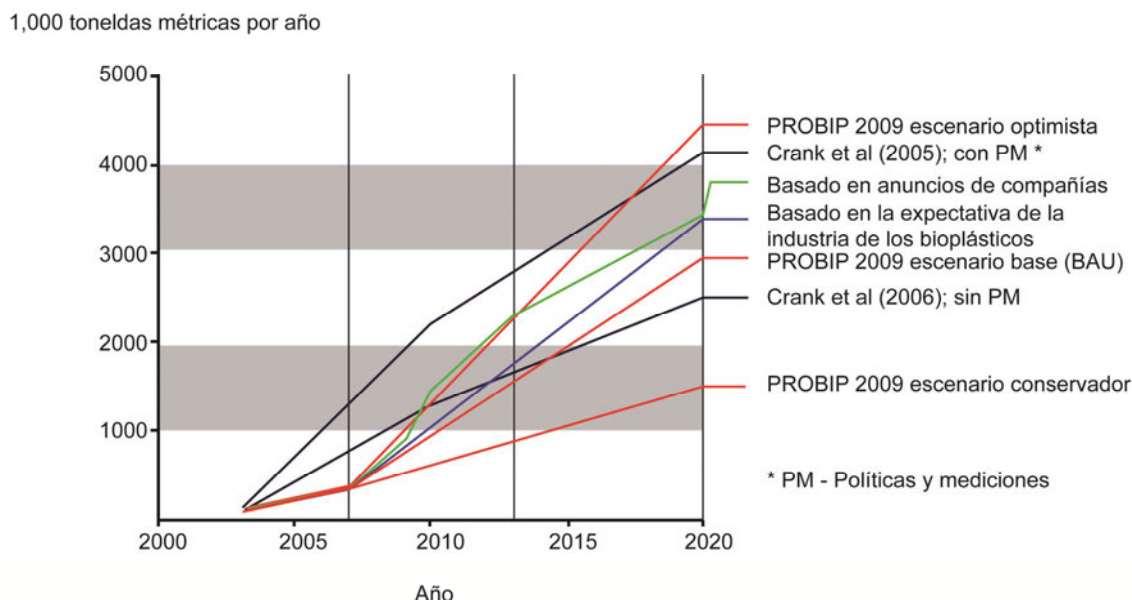
Fuente: European Bioplastics (Disponible en línea: <<http://www.european-bioplastics.org>>).

²⁹ De acuerdo con la definición de European Bioplastics, los bioplásticos provienen de recursos renovables, son biodegradables o ambos. Los bioplásticos se producen a partir de los biopolímeros, por lo que podemos afirmar que se trata del mismo material.

No podemos dar por sentado los beneficios inmediatos que nos ofrecen estas alternativas, es necesario el análisis de futuros escenarios de consumo y el ciclo de vida de estos materiales para determinar si realmente estamos desarrollando opciones que son congruentes con los objetivos para lograr un desarrollo sustentable.

En la **Figura 16** es posible apreciar una tendencia en el aumento de la producción mundial de bioplásticos en los últimos seis años, con lo cual se logra hacer una proyección de cuál será el nivel de producción en el año 2013. Podemos apreciar distintas interpretaciones como la que ofrece el PRO-BIP del 2009, un reporte donde se caracteriza y analiza la situación de los bioplásticos actualmente y con proyecciones para el año 2020. La importancia de la información presentada en la **Figura 17**, radica en que se comparan distintos enfoques lo cual da como resultado variaciones en la cantidad de producción, pero todas las interpretaciones indican una tendencia al aumento en la producción con el paso del tiempo.

Figura 17. Proyección de la capacidad mundial de bioplásticos hasta el 2020.



Fuente: PRO-BIP (Product overview and market projection of emerging bio-based plastics, 2009).

¿Cuánta tierra de cultivo se utiliza para la producción de bioplásticos?

En relación a un estudio realizado por European Bioplastics®, se estima que la capacidad mundial de bioplásticos es de 1, 000,000 ton². De una hectárea de tierra se pueden obtener de 2 a 4 toneladas de bioplásticos, el consumo actual del mercado europeo es de 75,000 hectáreas, lo cual equivale al 0.05% del área de agricultura de la Unión Europea. Haciendo una suposición en la que para el año 2020 se desarrolle un mercado de 2.5 millones de toneladas, tal crecimiento implicaría el uso de 1.25 millones de hectáreas, equivalente al 0.07% de la tierra de cultivo en Europa (Food Biopack Project, 2000).

Tabla 10. Tierra con potencial para la producción de biopolímeros.

Actividad	Tierra naturalmente irrigada, con potencial para arado(millones de hectáreas)
Cultivo	1,500
Bosque	800
Áreas protegidas	330
Áreas residenciales, caminos y vías	100
Tierra con potencial para la producción de biopolímeros y biocombustible	570
Total	3,300

Fuente: Estimación hecha por European Bioplastics con datos de la FAO (2009).

Esta información pertenece a un contexto diferente al de México, pero no totalmente ajeno, ya que de igual manera se desarrolla el mercado de los bioplásticos. Es importante notar la equivalencia de tierra de cultivo requerida para producir una cantidad específica de bioplásticos, en relación al mercado europeo, se pone en evidencia que existe la capacidad agrícola para el aumento en la producción de los mismos, pudiendo inferir que no faltaría tierra de cultivo para producir alimentos. En este sentido cabe destacar que actualmente se experimenta con biomasa proveniente de residuos agroindustriales para la producción de biopolímeros, lo cual implicaría reducir los cultivos destinados específicamente para la producción de bioplásticos (T.H. Vink, R. Rábago, A. Glassner, y R. Gruber, 2003).

Los biopolímeros se presentan como una alternativa atractiva para el desarrollo de un material biocompuesto que se pueda biodegradar, la demanda de estas sustancias va en aumento lo cual implica el surgimiento de distintos cuestionamientos que parecen no representar un factor de riesgo en un futuro escenario de aumento en la producción de estos materiales, lo cual no debe pasar desapercibido, ya que son necesarias evaluaciones extensas de los impactos en los pilares para la sustentabilidad; ambiental, social, cultural y económico.

2.5 Reciclaje de residuos como estrategia de ciclo de vida

El desarrollo de un material biocompuesto requiere que se contemple todo el ciclo de vida para justificar su fabricación e integración al sistema de producción y consumo. La problemática material del ser humano requiere de alternativas para la construcción y modificación del ambiente artificial, que permitan una disminución del impacto ambiental generado por esta actividad incesante. A partir de la convergencia de ideas en relación a las alternativas para construir nuestro ambiente artificial, se sintetizan los siguientes criterios para el desarrollo de un material biocompuesto:

Desmaterialización

- Minimizar el consumo de materia y energía.
- Utilizar recursos reciclados.
- Utilizar recursos que puedan reciclarse, reutilizarse o degradarse fácilmente.
- Aprovechar residuos como materia prima.

Disponibilidad

- Utilizar recursos renovables.
- Utilizar recursos nacionales para disminuir las distancias de transporte y fomentar los mercados locales y contribuir al desarrollo económico y social.

Compatibilidad

- No utilizar sustancias tóxicas para el ambiente y la salud humana.

Desempeño

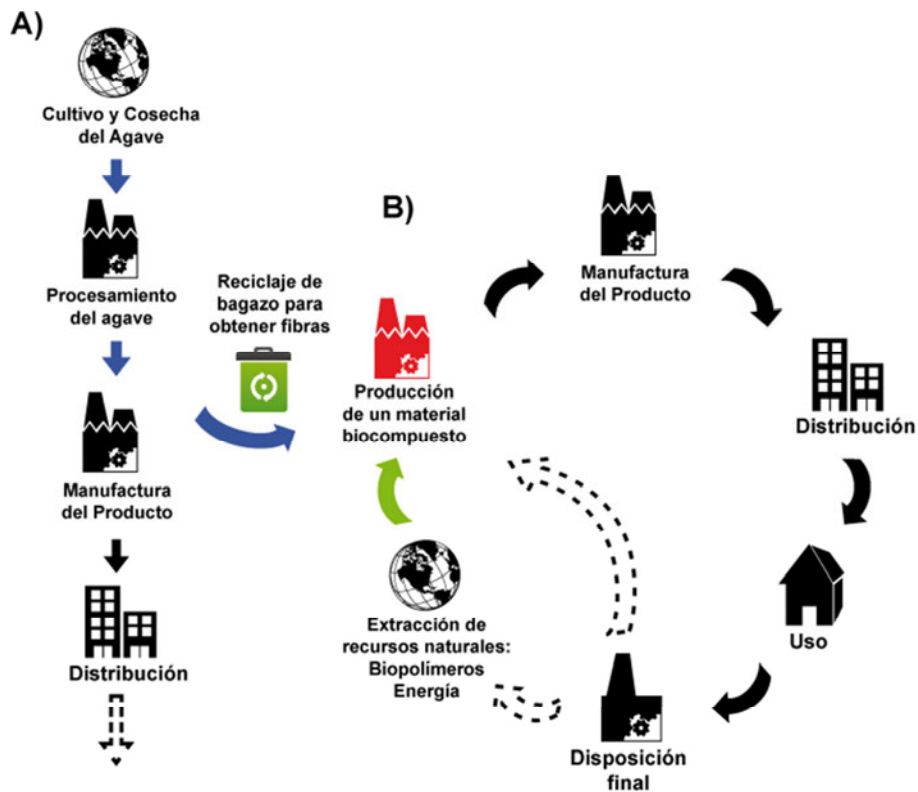
- Capacidad de cumplir con los requerimientos funcionales.
- Seleccionar métodos de producción con un bajo impacto ambiental.
- Procesar con los métodos productivos existentes.

Como punto de partida el criterio de desmaterialización nos ayuda a orientar el ciclo de vida del material hacia una noción que considere el máximo aprovechamiento de la materia y la energía. La entrada y salida de sustancias durante el ciclo de vida debe visualizarse de tal manera que se mantengan en constante flujo y transformación, en este sentido la idea de los metabolismos industriales fomenta la transformación continua de los materiales, mediante la reintegración al sistema de producción y consumo o al medio ambiente. El concepto de simbiosis industrial plantea que se aprovechen residuos de una industria como materia prima para el funcionamiento de otra, en este sentido se promueve la desmaterialización mediante el reciclaje o el reuso.

En el esquema del ciclo de vida presentado en la **Figura 18** se plantea el desarrollo de un material biocompuesto a partir del aprovechamiento de residuos como materia prima, se da por sentado que en todas las etapas del ciclo existe la entrada y salida de materia y energía (p. ej. el transporte). El caso de la generación de residuos en la agroindustria del tequila se visualiza como el ciclo A, de este ciclo se recupera el bagazo generado en la etapa de procesamiento del agave, para obtener fibras y así implementarlas como agente de refuerzo en la producción de un material biocompuesto como parte del ciclo B. En el esquema se describe un reciclaje de ciclo abierto, en el cual el residuo se utiliza para generar un producto diferente al original. Podemos notar que la producción del material es sólo una etapa del ciclo de vida, lo cual delimita parte de los alcances de esta investigación.

Nos enfocamos en los materiales biocompuestos tomando como guía la categoría 1 de los ecomateriales, Materiales Cíclicos, en la cual se contemplan los materiales renovables, materiales reciclados y materiales para la eficiencia. La renovabilidad de los materiales surge como parte esencial del objetivo por satisfacer las necesidades del presente y garantizar los recursos para las generaciones futuras (Comisión Brundtland), de esta manera se fomenta un cambio hacia una mayor dependencia de los recursos renovables y una mejor gestión de los recursos no renovables.

Figura 18. Ciclo de vida de un material biocompuesto mediante el aprovechamiento de residuos.



La agroindustria del tequila es una productora confiable de biomasa, que puede utilizarse como agente de refuerzo en la producción de un material biocompuesto. El reciclaje del bagazo de agave implica distintos procesos de transformación para obtener fibras, en este sentido se presenta la ventaja de que existe una empresa que ya se dedica a esto, de manera que se contempla como un proceso externo.

La etapa de extracción de recursos no se sustituye por completo, la producción de cualquier material requiere necesariamente de recursos naturales, ya sea para producir la energía que demanda la maquinaria o para la obtención de otros recursos, como agua y materia prima adicional. En este sentido al enfocarnos en los materiales biocompuestos, es necesario el uso de una matriz de unión para complementar a las fibras de bagazo, así como otros recursos. Se considera a los biopolímeros que provienen de recursos renovables, como un tipo de matriz que permite conservar la biodegradabilidad de las fibras de bagazo y se encuentran disponibles en el mercado. En la etapa de disposición final del material se proyectan dos escenarios, primero la posibilidad de su reciclaje de ciclo cerrado para reprocesarlo en la etapa de producción y en segunda instancia la biodegradación del biocompuesto que permite considerar su compostaje, mediante el cual se puede producir abono orgánico, que se podría utilizar para mejorar la calidad del suelo de cultivo del agave y de los cultivos para la producción de biopolímeros. En ambas alternativas se implicaría "cerrar" el ciclo de vida del material, al lograr aportar nutrientes a los recursos naturales a partir de los cuales se obtiene la materia prima para la etapa de producción.

CAPÍTULO III

Caso de Estudio: Elaboración de un Material Biocompuesto para el Reciclaje de Residuos Agroindustriales del *Agave tequilana*

La estrategia de ciclo de vida para el desarrollo del material biocompuesto nos impulsa a plantear un caso de estudio para llevar a cabo la etapa de producción y de esta manera poder obtener muestras para el análisis de las propiedades del material, para determinar la viabilidad a futuro para la aplicación del mismo en la manufactura de un producto. A partir de la revisión del marco teórico y el planteamiento de la problemática en el capítulo anterior, se identifican los siguientes factores clave:

- Mala gestión de los recursos naturales y su explotación desmedida.
- Degradación del ambiente debido al impacto ambiental del desarrollo humano.
- Acumulación de residuos sólidos urbanos.
- Aprovechamiento óptimo de residuos para disminuir el consumo de materiales vírgenes.
- Aumento en la investigación para producir materiales que se integren a los ciclos metabólicos naturales.

Hipótesis

- Los residuos agroindustriales del *Agave tequilana* Weber se pueden utilizar como agente de refuerzo en un material biocompuesto que sea biodegradable.
- La implementación de materiales biocompuestos para la producción de objetos e infraestructura diseñados, puede ayudar a optimizar el ciclo de vida de los mismos.

Para realizar la producción del material biocompuesto se propone un estudio experimental en el que se busca alcanzar los siguientes objetivos:

- Elaborar un material biocompuesto reforzado con fibras de bagazo de agave tequilana.
- Implementar un biopolímero biodegradable como matriz de unión.
- Realizar un análisis de las propiedades del biocompuesto.
- Aportar información para la implementación del material.
- Fomentar el desarrollo de nuevos materiales que respondan a la problemática de la explotación desmedida del ambiente y la dependencia de los recursos no renovables.

Existen antecedentes de la elaboración de materiales biocompuestos reforzados con fibras naturales que aportan un importante punto de referencia para conocer las propiedades que pueden tener estos materiales, su procesabilidad y las variaciones en relación a las materias primas utilizadas. Para llevar a cabo la experimentación se hizo contacto con el Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY), ubicado en la ciudad de Mérida, en el cual se encuentra la Unidad de Materiales donde se han realizado notables investigaciones en el uso de fibras de agave para reforzar materiales compuestos.

3.1 Materiales biocompuestos reforzados con fibras de agave

La investigación en el desarrollo de nuevos materiales biocompuestos reforzados con fibras naturales ha fomentado la experimentación con distintas materias primas, en México desde hace más de 30 años podemos encontrar antecedentes de estos esfuerzos, como la elaboración de tableros reforzados con bagazo de caña (Carrillo Ceseña, 1975), o el estudio acerca de los tableros aglomerados y la posibilidad de utilizar distintas fibras naturales (Hernandez de Anda, 1977), estos se presentan como importantes antecedentes del uso de residuos agrícolas y agroindustriales. En relación al uso de fibras de agave, como el henequén, y el agave tequilana, el desarrollo de materiales biocompuestos en el Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY) ha destacado, siendo el principal antecedente de la integración de fibras de las plantas agaváceas como refuerzo en materiales compuestos. En las investigaciones realizadas se han utilizado matrices termoplásticas a partir de plásticos petroquímicos, como polietileno (PP) y polietileno (PE) para elaborar láminas acanaladas y tableros aglomerados, mediante extrusión y moldeo por compresión (Balam Cocom, Duarte, y Canché, 2006), (Canché Escamilla, Obtención de Celulosa y Materiales Compuestos a partir de los Residuos Generados de la Explotación de las Agaváceas, 2010). Esta línea de investigación continúa hoy en día en el CICY, lo cual ha dado como resultado una amplia gama de estudios del aprovechamiento de los residuos agroindustriales de distintos agaves.

La elaboración de materiales biocompuestos con matrices a partir de polímeros petroquímicos, representa algunas desventajas, como las complicaciones para su disposición final, ya que no pueden ser biodegradados al terminar su vida útil. A esta limitante se le han dado distintas soluciones, como la sustitución de la matriz o el uso de aditivos que aceleran la oxodegradación³⁰ del plástico. Otra importante desventaja es que los materiales termoplásticos dependen de la extracción de un recurso no renovable que es el petróleo, lo cual ha llevado al desarrollo de alternativas como los biopolímeros que presentan compatibilidad con el ciclo de vida de las fibras naturales.

Figura 19. Bagazo del procesamiento del henequén (*Agave fourcroydes*).



Fuente: Imagen tomada en la hacienda Sotuta de Peón en Yucatán.

La biodegradabilidad de las fibras naturales ha sido centro de interés para quienes buscan materiales de refuerzo que puedan degradarse de forma natural. La aplicación de las fibras naturales en los materiales compuestos con polímeros petroquímicos interfiere con el ciclo de vida de las fibras, al impedir que el material se pueda biodegradar en su totalidad. La implementación de una matriz de unión a partir de recursos renovables permite mantener la cualidad de las fibras de biodegradarse en la etapa de su disposición final o incluso poder reciclarse. Las desventajas mencionadas no pretenden demeritar la importancia de la investigación y fabricación de materiales biocompuestos reforzados con fibras naturales a partir de plásticos petroquímicos reciclados, ya que presentan una buena opción para el aprovechamiento de ambos tipos de residuos. La

³⁰ Polímero de origen fósil al cual se le añade un catalizador que permite su oxidación. Se biodegradarán con la presencia de oxígeno en una escala temporal que puede ser determinada aproximadamente por la formulación química que se agrega al plástico convencional durante la fabricación. Son por lo tanto plásticos de vida útil controlada.

investigación llevada a cabo en el CICY es de suma importancia para lograr los objetivos del caso de estudio en cuestión, ya que demuestra y respalda la posibilidad de aprovechar fibras de los residuos agroindustriales del *Agave tequilana*, lo cual implica la posibilidad de poder realizarlo con fibras de otras plantas agaváceas.

3.2 Materiales biocompuestos de poliácido láctico (PLA) y fibras naturales

Existe un creciente interés por desarrollar materiales con un menor impacto ambiental por lo que es posible encontrar diversas investigaciones actuales, nacionales e internacionales, acerca de la elaboración y caracterización de materiales biocompuestos de poliácido láctico (PLA) reforzado con fibras naturales, debido a sus buenas propiedades y capacidad de biodegradarse. La industria automotriz es un ejemplo de un sector en el que ha aumentado el uso de fibras naturales en los compuestos elaborados para paneles interiores, con interés por la implementación de materiales biodegradables (Mohanty, Misra, y Drzal, 2005). En esta industria no se han utilizado en específico paneles de PLA reforzados con fibras naturales, pero esto no determina que en un futuro no pueda ser una aplicación viable. El interés por diversificar los usos del PLA ha implicado una mayor demanda de investigaciones que propongan el desarrollo de materiales biocompuestos, por lo que podemos encontrar diversos trabajos en la última década que exploran esta alternativa.

La investigación de las propiedades de materiales biocompuestos de PLA con fibras de lino (Oksman, Skrifvars, y Selin, 2003), así como otras en relación al uso de aditivos, envejecimiento por agua de mar, así como los efectos del reciclaje (Le Duigou, Pillin, Bourmaud, Davies, y Christophe, 2008), dieron como resultado que la fuerza del biocompuesto es aproximadamente 50% mejor comparado con un material similar de PP y fibras de lino, el cual es utilizado actualmente en muchos paneles para la industria automotriz (Faruk, Bledzki, Fink, y Sain, 2012). El PLA como matriz de unión proporciona propiedades adecuadas para competir contra los polímeros petroquímicos y abre la posibilidad para considerar nuevos campos de aplicación.

En la Universidad de Tecnología Química de Beijing, se han llevado a cabo estudios acerca de materiales biocompuestos de PLA reforzados con fibras de bambú, madera y coco, a los cuales se les realizaron ensayos mecánicos y térmicos, concluyendo que el compuesto con mejor resistencia a la tensión fue en el que se utilizó fibra modificada de coco. También observan que el contenido de fibra puede mejorar las propiedades térmicas de los materiales (Zhang, Shi, Nie, Wang, y Yang, 2012). En Japón, Shiji Ochi (2008) ha investigado la elaboración de materiales biocompuestos mediante moldeo por compresión, utilizando fibras de kenaf y PLA, demostrando buena resistencia a la tensión y flexión. En la India se realizó la experimentación con biocompuestos de PLA con fibras de plátano modificadas con diferentes tratamientos, para estudiar los efectos en las propiedades de los materiales, así como probar la degradación del material (Jandas, Mohanty, Nayak, y Srivastava, 2011).

Se encontraron pocas fuentes de información en relación al uso de fibras de agave como refuerzo en materiales biocompuestos de PLA. En la Universidad Kao Yuan, en Taiwán, en el año 2011 se publicó un artículo acerca de la elaboración y caracterización de materiales compuestos reciclando poliácido láctico e implementando fibras de sisal, en el cual se concluye que el tratamiento del PLA con ácido acrílico, mejora las propiedades mecánicas de los compuestos (Wu, 2011). En China, Li Zhaoqian et al. (2011) realizaron una investigación con materiales biocompuestos de PLA y fibra de sisal, en el cual se estudian los efectos de la modificación de las fibras en las propiedades del material, concluyendo que la modificación permite mejorar algunas características del compuesto.

No fue posible encontrar un antecedente del uso específico de la fibra de agave tequilero para reforzar un biocompuesto de PLA, sin embargo la información disponible del uso del *Agave sisalana*, nos otorga una referencia acerca de las posibles propiedades que pueda tener un material reforzado con fibras de agave tequilero. A partir de la consulta de los antecedentes en la

elaboración de materiales biocompuesto de PLA reforzado con fibras naturales, se puede sintetizar que el PLA exhibe características adecuadas para actuar como matriz de unión en materiales biocompuestos reforzados con distintas fibras naturales, lo cual presenta la oportunidad de implementarlo como materia prima en la elaboración del material biocompuesto.

3.3 Componentes del material biocompuesto

Un material biocompuesto es un sistema integrado por una mezcla o combinación de dos o más micro o macroconstituyentes que difieren en forma y composición química, y que son esencialmente insolubles entre sí. En este caso nos referimos a un biocompuesto biodegradable proveniente de recursos renovables, a partir de un biopolímero biodegradable como matriz de unión y fibras de bagazo de agave tequilana como agente de refuerzo, es necesario realizar una revisión de la información disponible acerca de ambas partes

MATRIZ – Biopolímero PLA

Para lograr la biodegradabilidad del material, se plantea la implementación de un biopolímero como matriz de unión, para realizar la selección de la materia prima se tomaron en cuenta los siguientes criterios:

- Proveniente de recursos renovables.
- Disponible en el mercado.
- Posible aplicación en la industria.
- Procesable por diversos métodos de producción.
- Resistencia.
- Estabilidad en el medio ambiente.
- Biodegradable.

Encontramos que actualmente el biopolímero que cumple mejor estos criterios es el PLA, siendo el biopolímero biodegradable a partir de recursos renovables de mayor producción en el mercado (European Bioplastics, 2012). Existen antecedentes en la investigación acerca del uso del PLA en biocompuestos reforzados con fibras naturales, lo cual nos indica la factibilidad para utilizarlo en este tipo de materiales.

El PLA no es un polímero nuevo, Carothers investigó la producción de PLA en 1932 (Mohanty, Misra, y Drzal, 2005). En 1997 la formación de la compañía Cargill Dow LLC, unió a dos grandes empresas con el objetivo de producir y comercializar el PLA para reducir los costos de producción. El poliláctico, que también se le llama ácido poliláctico³¹ (PLA) es un polímero termoplástico rígido que puede ser semicristalino o totalmente amorfo. El ácido láctico es el bloque de construcción básico del PLA, es altamente soluble en agua. Es usado como acidulante en alimentos, producción de polímeros biodegradables y al convertirlos a esteres puede ser usado como solvente ecológico para limpiar metales, pinturas y recubrimientos. El ácido láctico es producido por medio de fermentación usando recursos renovables. Los productos derivados del almidón tales como dextrinas o glucosa son extensamente usados como materias primas de medios fermentativos para producir ácido láctico. La glucosa puede ser fermentada y convertida en ácido láctico, el cual puede ser polimerizado a un polímero de alto peso molecular como es el PLA e igualmente copolimerizado. Su uso como plástico biodegradable es de considerable interés y demanda, actualmente podemos encontrar diversas aplicaciones principalmente en productos desechables y en la industria médica (Kulinski y Piorkowska, 2005). Una de las desventajas dominantes del uso de este biopolímero sigue siendo su alto costo, pero el aumento de su demanda con el paso del tiempo ha contribuido a la reducción del precio.

³¹ En las fuentes de información donde se menciona el biopolímero PLA es posible encontrar distintas traducciones, incluso en publicaciones en México se pueden detectar las dos denominaciones.

Figura 20. Pellets de PLA grado extrusión.



Fuente: PLA grado extrusión producido por la empresa Nature Works™.

Propiedades del PLA

Existen distintos tipos de biopolímero PLA lo cual implica variaciones en las propiedades del material, en este sentido los métodos disponibles para la experimentación determinan las características de la materia prima necesaria. Se ha seleccionado el biopolímero Ingeo 2003D, de la empresa Nature Works™ ya que se puede procesar por extrusión, siendo el método disponible para realizar la experimentación. Este tipo de PLA también permite el termoformado de láminas lo cual podría aprovecharse para adoptar una forma determinada. La disponibilidad de este material por medio de un proveedor nacional facilita su adquisición, lo cual es determinante para lograr la experimentación. Para establecer un marco de referencia se presenta la siguiente información acerca de las propiedades del PLA, aportada por el fabricante y otras fuentes.

Propiedades físicas

Tabla 11. Propiedades físicas del PLA.

Propiedad	Ingeo 2003D	Método ASTM ³²
Peso específico	1.24 g/cc	D792
Densidad	1.24 g/cm ³	
Índice de Fluidez (MFI)	5.00 - 7.00 g/10 min	D1238
	Carga de 2.16 kg,	
	Temperatura 210 °C	

Fuente: Información disponible en línea Matweb Material Property Data.

³² Creada en 1898, ASTM International es una organización que desarrolla normas voluntarias por consenso. aplicables a materiales, productos, sistemas y servicios.

Propiedades mecánicas

Tabla 12. Propiedades mecánicas del PLA.

Propiedad	Ingeo 2003D	Método ASTM
Resistencia a la Tensión al punto de Ruptura	53.0 MPa	D882
Resistencia a la Tensión en el punto de Cedencia	60.0 MPa	D882
Elongación	6.00%	D882
Módulo de Tensión	3.45 GPa (3450 MPa)	D882
Resistencia a impacto Izod con muesca	12.81 J/m	D256
Temperatura de Distorsión por Calor	55 °C	E2092

Fuente: Información disponible en línea Matweb Material Property Data.

En la **Tabla 13** podemos apreciar algunas propiedades mecánicas de PLA, comparadas con las de plásticos petroquímicos, incluyendo el Poliestireno (PS), Policloruro de Vinilo (PVC) y Polipropileno (PP).

Tabla 13. Comparación de propiedades mecánicas del PLA con plásticos petroquímicos.

Propiedad	PLA	PS	PVC	PP
Resistencia a la Tensión (Cedencia) MPa	60	49	35	35
Elongación %	2.5	2.5	3.0	10
Módulo Elástico GPa	3.2	3.4	2.6	1.4
Resistencia a la Flexión MPa	70	80	90	49

Fuente: (Plastics from microbes: microbial synthesis of polymers and polymer precursors, 1994).

Esta comparación nos ayuda a entender el potencial de la matriz a partir del biopolímero PLA, pudiendo anticipar el comportamiento del biocompuesto. Podemos apreciar en la **Tabla 13** que las propiedades mecánicas del PLA presentan mayor resistencia a la tensión en comparación con el PS, PVC Y PP, y mayor resistencia a la flexión que el PP. El módulo elástico del PLA indica que es un material rígido y posiblemente más quebradizo que el PVC y el PP.

El PLA presenta buenas propiedades mecánicas para conformar materiales biocompuestos, los antecedentes de investigación demuestran la factibilidad de utilizar como matriz este biopolímero biodegradable, la mezcla con las fibras de bagazo de agave afectará estas propiedades, ya sea como un complemento o un detrimento.

Propiedades ópticas

Tabla 14. Propiedades ópticas del PLA.

Propiedad	Ingeo 2003D
Visibilidad	90.00%

Fuente: Información disponible en línea Matweb Material Property Data.

Propiedades químicas

Tabla 15. Solubilidad del biopolímero PLA.

Solvente	Ingeo 4060D (%) solubilidad	Ingeo 4032D (%) solubilidad
1,2 Dicloroetano	99.8	99.9
DMF (dimetilfurano)	99.8	67.5
Heptano	8.6	27.5
Alcohol isopropílico	0	0
MIBK (metil isobutil cetona)	20.6	0
Octanol	1.3	5.2
THF (tetrahidrofurano)	99.8	99.9
Tolueno	99.8	0.4

Fuente: Información obtenida del fabricante, estos dos grados del biopolímero representan el rango de mayor y menor grado de solubilidad de los productos que ofrece la empresa.

Propiedades de procesamiento

Tabla 16. Propiedades de procesamiento del PLA grado extrusión.

Propiedad	Ingeo 2003D
Temperatura de Alimentación	180 °C
Temperatura del Adaptador	200 °C
Temperatura del Dado	190 °C
Temperatura de fusión	210 °C
Temperatura de Secado	90.0 °C
	Tiempo 2 h
Contenido de Humedad	<= 0.0250 %
Punto de Condensación	-40.0 °C
Ritmo de Aire de Secado	>= 14.2 l/min
Velocidad del Tornillo	20.0 - 100 rpm

Fuente: Información disponible en línea Matweb Material Property Data.

Esta información es importante ya que las propiedades del material biocompuesto están determinadas en gran parte por la matriz de unión, en este sentido datos como la solubilidad del PLA, nos permiten anticipar con certeza qué sustancias afectarán al material que se pretende elaborar. Para llevar a cabo la experimentación, las propiedades de procesamiento aportan un punto de partida para asignar las temperaturas durante la experimentación. Es importante destacar que las propiedades del PLA no actúan como determinantes en las características de un biocompuesto, a manera de un sistema las propiedades del agente de refuerzo afectan también de manera considerable al material resultante, por lo que deben ser revisadas.

AGENTE DE REFUERZO – Fibra de bagazo de *Agave tequilana*

Las fibras de bagazo de agave tequilana (FAT, también se le identifica en otras investigaciones como FBAT) presentan una composición lignocelulósica, en la cual domina la proporción de celulosa, como se puede apreciar en la **Figura 21** y **22**, la superficie de las fibras muestran una estructura lineal.

Figura 21. Microscopía de las fibras de bagazo de agave tequilana.

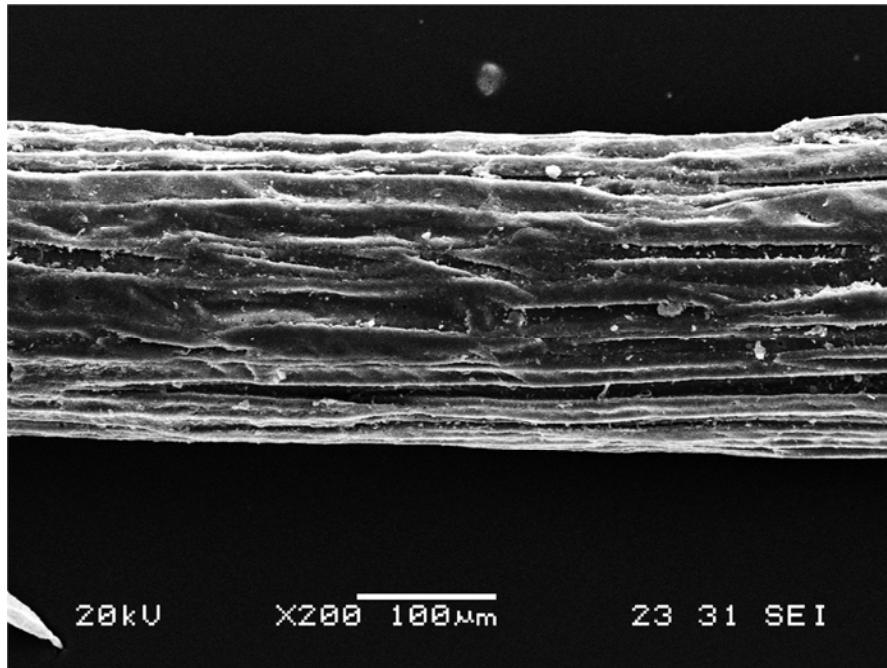
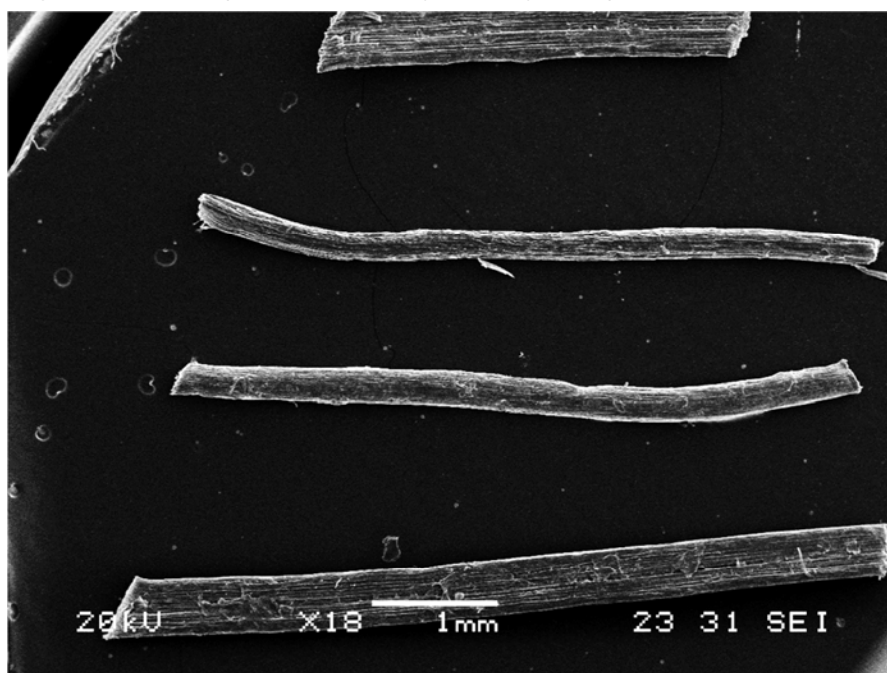


Figura 22. Microscopía de fibras de bagazo de agave tequilana.



Fuente: Imágenes obtenidas por microscopía electrónica de barrido (SEM), operador Santiago Duarte Aranda, 2012, CICY.

La celulosa es el componente estructural más importante en casi todas las paredes celulares de las plantas verdes, especialmente en las fibras duras (Summerscales et al., 2009). La lignina otorga la fortaleza y rigidez a la pared celular. Por ser inerte, resistente y muy estable, protege a los otros componentes de la pared contra ataques físicos, químicos y biológicos. Regula la hidratación de la celulosa, y la elasticidad de la pared. La estructura lineal de las fibras puede afectar las propiedades mecánicas del material dependiendo la orientación de las mismas dentro del biocompuesto después del procesamiento.

Propiedades de las Fibras

Propiedades Mecánicas

En la literatura disponible encontramos los siguientes datos acerca de las propiedades mecánicas de las fibras del *Agave tequilana*. Existen variaciones en los datos reportados en la literatura disponible, aun cuando en ambos casos sean del bagazo del agave, esto se puede deber a la variabilidad de las características de la planta por las condiciones climáticas y de nutrientes a las que haya estado expuesta durante su crecimiento.

Tabla 17. Propiedades mecánicas a tensión de la fibra del Agave tequilana.

Fibra	RUT (MPa)	ME (MPa)	ER (mm/mm)	Fuente
<i>Agave tequilana</i> Weber	189.48	11740	4.91	(Satyanarayana y et al., 2009)
	575.43	149.9	3.98	(Raygoza y Gastinel, 2008)

ER: Elongación a la ruptura.

ME: Módulo de elasticidad.

RUT: Resistencia última a la tensión.

Propiedades Químicas

Las fibras de agave se denominan como lignocelulósicas. El bagazo de agave tequilero, está formado por fibras gruesas de 10 a 12 cm de largo, compuestas principalmente por celulosa, lignina y hemicelulosa³³. En la **Tabla 18** se pueden apreciar las diferencias en la composición de las fibras provenientes de la piña de distintos tipos de agave, tanto de la base de las hojas como del tronco.

³³ “La hemicelulosa es un polisacárido que, excluyendo la celulosa, constituyen las paredes celulares de las plantas y se pueden extraer con soluciones alcalinas diluidas. A diferencia de la celulosa, tiene una composición heterogénea con varias unidades de azúcares (C5: xilosa, galactosa y arabinosa; C6: glucosa, manosa; y azúcares ácidos) (Canché Escamilla, 2010). Las hemicelulosas forman aproximadamente una tercera parte de los carbohidratos en las partes maderosas de las plantas”. (Scientific Psychic, Disponible en línea: <<http://www.scientificpsychic.com/fitness/carbohidratos2.html>>)

Tabla 18. Composición química de diferentes fibras de agave.

Fuente de fibras	Celulosa	Hemicelulosa	Lignina	Extraíbles	Referencia
<i>Agave tequilana</i> (hojas)	64.8	5.1	15.9	14	G. Iñiguez Covarrubias et al., 2001
<i>Agave tequilana</i> (tronco)	64.9	5.5	16.8	12.5	
<i>Agave Fourcroydes</i> (henequén)	77.6	5.7	13.1	3.6	R. Antonio Cruz et al., 2002
<i>Agave lechuguilla</i>	79.8	3-6	15.3	2-4	
<i>Agave sisalana</i>	73.1	13.3	11	2.6	A.K. Bledski y J. Gassan, 1999

Fuente: (Balam Cocom, Duarte, y Canché, 2006, pág. 40)

Podemos observar que en cuanto a niveles de celulosa y lignina existen variaciones pero en general en proporción domina el contenido de celulosa. La composición similar entre los diferentes tipos de Agave amplía la posibilidad de diversificar las fuentes de materia prima para la elaboración de materiales biocompuestos. La lignina es hidrofóbica lo cual ayuda a evitar parte de la absorción de agua. Por otra parte la celulosa es higroscópica lo cual implica que absorbe agua y se hincha. Esta propiedad estará presente al integrar las fibras en un biocompuesto, y será variable en relación al contenido de fibra en el material, así como la absorción de agua del PLA.

De manera específica la composición del bagazo del agave tequilero se describe con más detalle en la **Tabla 19**.

Tabla 19. Composición del bagazo de agave tequilero.

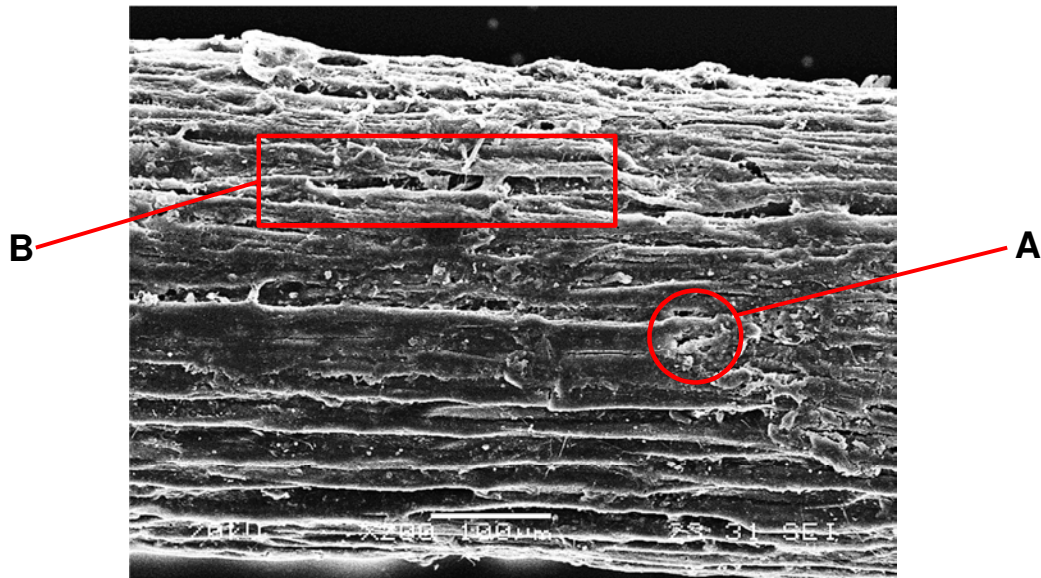
Análisis	Valor
Humedad (%)	71
pH	5.4
Material soluble en benceno-alcohol (%)	3.15
Material soluble en agua (%)	3.94
Cenizas (%)	1.99
Densidad (g/cm ³)	1.45
Carbono orgánico total (% Base seca)	50.6
Nitrógeno total (% Base seca)	0.53
Relación C:N	95.5
Fibra detergente neutra (% Base seca)	8.8
Fibra detergente ácida (% Base seca)	46.7
Hemicelulosa (%)	6.14
Celulosa (%)	65.96
Lignina (%)	16.85

Fuente: Información obtenida de (González García, González Reynoso, y Nungaray Arellano, 2005, pág. 4) (Raygoz y Gastinel, 2008).

El alto contenido de celulosa determina ciertas propiedades de las fibras, los datos reportados en ambas tablas acerca de la fibra de agave tequilana presentan similitudes en cuanto a los niveles de celulosa y lignina. De manera similar que la madera, la celulosa en las fibras de agave presenta un comportamiento hidrofílico, lo cual significa que las células tienen la capacidad de hincharse al absorber humedad, así como la capacidad de perderla. La estructura de las fibras de agave también está relacionada con la propiedad de absorber agua de la misma, ya que presentan poros

(A) y aberturas (B) que funcionan a manera de canales de diversas dimensiones, los cuales incrementan y retienen el volumen de agua (Figura 23).

Figura 23. Microscopía de una fibra de bagazo de agave tequilero.



Fuente: Imágenes obtenidas por microscopía electrónica de barrido (SEM), operador Santiago Duarte Aranda, 2012, CICY.

A – Poros
B – Canales

3.4 Elaboración y análisis del biocompuesto PLA/FAT

Estrategia Experimental

La experiencia en la elaboración de materiales biocompuestos y el uso de fibra de agave en el Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY), impulsó a establecer un vínculo entre distintas disciplinas e instituciones académicas, para llevar a cabo los objetivos de esta investigación para lograr el desarrollo del material biocompuesto con el biopolímero PLA como matriz de unión y como agente reforzante fibra de bagazo de agave tequilana (PLA/FAT). De esta manera se realizó una estancia experimental en las instalaciones del CICY para elaborar el material biocompuesto. Las pruebas se realizaron bajo la asesoría del Dr. Gonzalo Canché Escamilla en la Unidad de Materiales. El método de extrusión se determinó como el más adecuado para realizar la mayor parte de la experimentación debido a su disponibilidad, y compatibilidad con el grado del biopolímero disponible como materia prima. También se consideró viable el procesamiento por moldeo por compresión. Para determinar la viabilidad de las alternativas de aplicación, y así en un futuro poder responder a los requerimientos de diseño, fue necesario obtener información sobre las propiedades del material biocompuesto. La estrategia experimental estuvo organizada de la siguiente manera:

- Elaboración de materiales compuestos con políácido láctico (PLA) como matriz y fibras de bagazo de *Agave tequilana* (FAT) como refuerzo.
 - Elaboración de muestras con diferente contenido de fibra.
 - Procesamiento por extrusión y moldeo por compresión.
- Caracterización de los materiales compuestos mediante la determinación de sus propiedades físicas, mecánicas y térmicas.

Al no encontrar un antecedente directo del uso de fibras de bagazo de agave tequilana y PLA en la elaboración de un material biocompuesto, se considera pertinente llevar a cabo la elaboración del material en el cual no se aplique de manera inicial ningún pretratamiento al agente de refuerzo o a la matriz de unión, para analizar primero las propiedades y establecer un antecedente del cual se podrá partir para realizar un estudio específico acerca de la afectación de pretratamientos y aditivos.

3.4.1 Materiales de experimentación

Los materiales a utilizar durante la experimentación para la elaboración de materiales biocompuestos fueron los siguientes:

- **Matriz:** Políácido láctico (PLA), Ingeo 2003D, empresa Nature Works™, lote AA0828B131.
- **Agente de refuerzo:** Fibras de *Agave tequilana* Weber (FAT), provenientes del bagazo residual después de la cocción de las piñas y su molienda para la obtención de los azúcares. Se utilizaron distintas concentraciones de fibra en las formulaciones las cuales se enlistan en la **Tabla 20**.

Tabla 20. Formulaciones utilizadas durante la experimentación.

Materiales	Matriz PLA (%)	Fibra de Agave (%)	Tamaño de fibra
PLA	100		
PLA/FAT10	90	10	40-60
PLA/FAT20	80	20	40-60
PLA/FAT30	70	30	40-60
PLA/FAT40	60	40	40-60
PLA/FAT20/60f	80	20	60-fondo
PLA/FAT30/60f	70	30	60-fondo

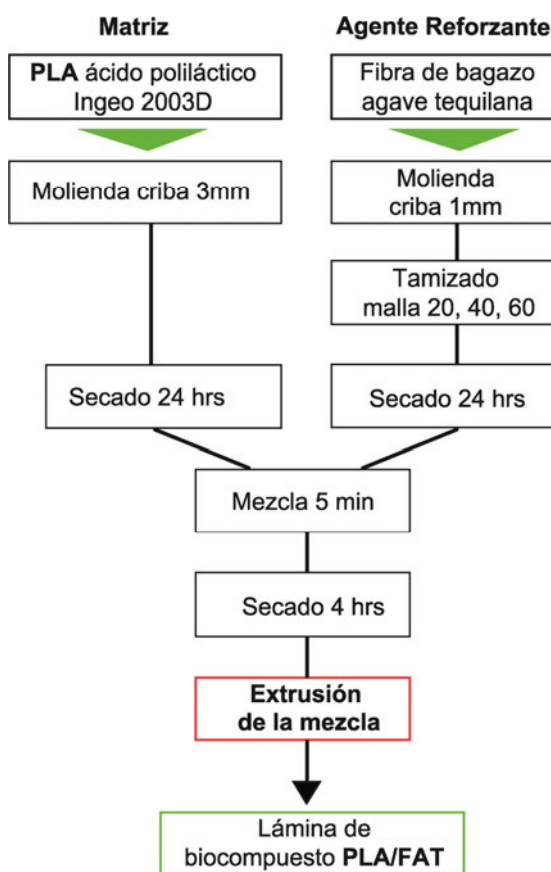
3.4.2 Procesamiento

Las fibras de agave se molieron en un molino de cuchillas marca Pagani con una criba de 1mm y después se tamizaron en un equipo ROTAP utilizando tamices circulares de 20.3mm (8") con tamaños de malla³⁴: 20, 40 y 60; también se recolectó la fibra sobrante de la malla 60 al fondo, para realizar una variación del material con un tamaño de fibra más pequeño. La fibra se secó en una estufa vertical a 80 °C durante 24 horas.

El PLA se molió en un molino de cuchillas marca Brabender con malla de 3mm y se secaron durante 24 horas a 80°C. Los materiales compuestos se obtuvieron mezclando el PLA con las fibras de agave, en una cámara de mezclado a 50rpm durante 5 minutos. La mezcla se secó durante 4 horas a 80°C en una estufa vertical antes de su procesamiento. En la **Figura 24** se describen las etapas del árbol de procesos para el procesamiento del material biocompuesto PLA/FAT.

Se obtuvieron materiales biocompuestos utilizando un extrusor doble husillo Brabender semindustrial, de 32mm de diámetro y 330.7mm de longitud, L/D=10, con 3 zonas de calentamiento más la temperatura del dado, los parámetros de extrusión se muestran en la **Tabla 21**. Se utilizó un dado plano de extrusión para obtener una lámina de 10cm de ancho y un espesor que varió de 1mm hasta 2mm, en un extrusor doble husillo. En la línea de procesamiento se utilizó un alimentador para dosificar el material hacia la tolva de alimentación para que el husillo no se sature. A la salida del dado de extrusión se colocó una calandra para mejorar el acabado final y controlar el espesor, después la lámina se pasó a través de un jalador para tensarla y evitar que se pandeara.

Figura 24. Árbol de procesos para el procesamiento.



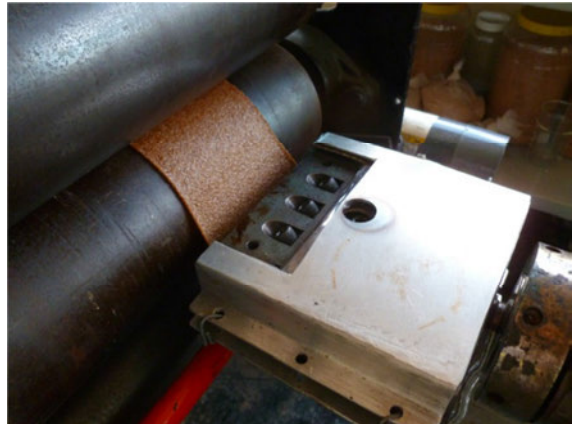
³⁴ Se entiende por tamaño de malla al que corresponde a la distancia del lado de cada cuadrado libre que forma el tejido de una malla cuadrada, o el diámetro de los orificios de una plancha cribada con agujeros circulares (Núñez, 2008). El número del tamaño de malla se refiere al asignado por la norma ASTM E 11-61; malla 20 (0.841mm) malla 40 (0.420) malla 60 (0.250mm).

Figura 26. Mezclado de formulación.



Fuente: Fotografía tomada durante la mezcla del material biocompuesto.

Figura 25. Extrusión de lámina con dado plano.



Fuente: Fotografía tomada durante la extrusión del material.

Tabla 21. Parámetros de extrusión

Nombre	Zona	PLA	PLA / FAT
Velocidad (rpm)		40	40
Torque (n/m ²)		350	400 - 500
Temperatura de alimentación (°C)	1	180	165
Sección de compresión (°C)	2	190	175
Sección de dosificación (°C)	3	200	185
Temperatura del dado (°C)	4	190	175

Los parámetros de extrusión se determinaron de acuerdo a la información que provee el fabricante del biopolímero, así como a las temperaturas que se han utilizado para elaborar otros biocompuestos con fibras de agave en el CICY, de esta manera el objetivo fue no degradar las fibras ya que esto ocurre a una menor temperatura en comparación con el biopolímero sólo. La temperatura de procesamiento del PLA permitió lograr esto, y se obtuvieron láminas de material biocompuesto en las cuales no se aprecia la degradación de las fibras.

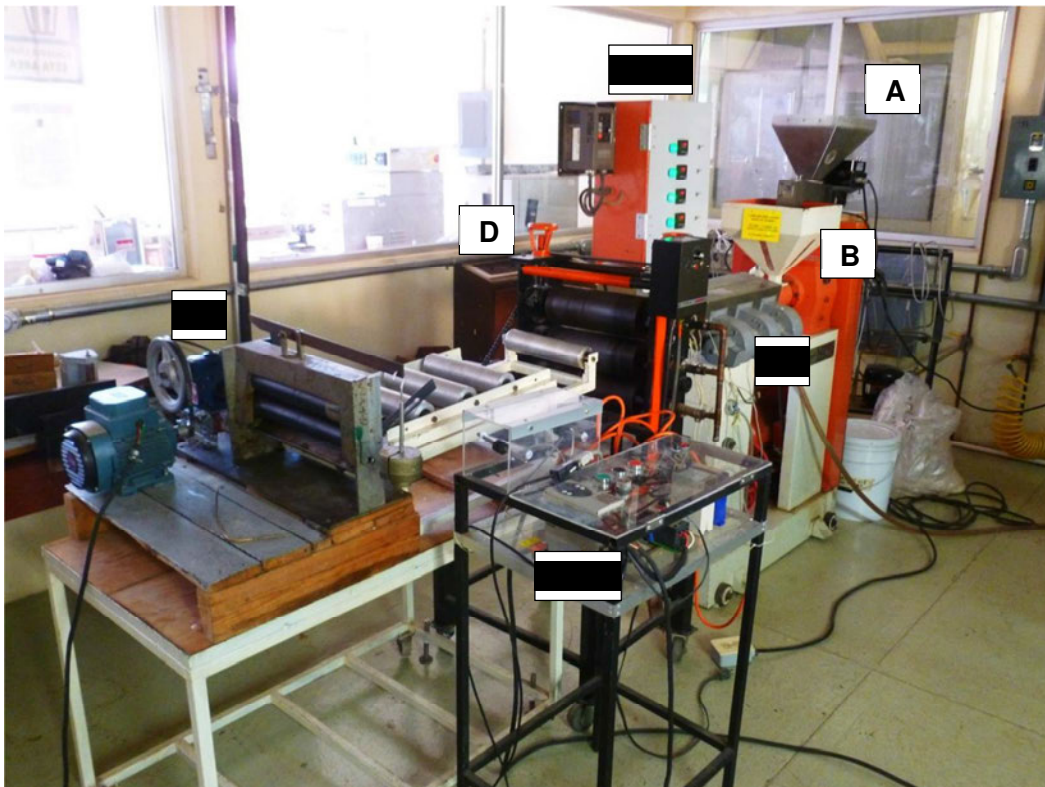
En la **Figura 28** se muestra un ejemplo de la línea de procesamiento para extruir el material biocompuesto PLA/FAT, con la excepción de estar utilizando un extrusor monohusillo con el cual también se elaboraron pruebas. El inicio del proceso corresponde al inciso **A**.

Figura 27. Extrusor doble husillo utilizado para obtener la muestras para el análisis.



Fuente: Fotografía tomada en el laboratorio de extrusión del CICY. Extrusora doble husillo.

Figura 28. Línea de procesamiento utilizando un extrusor monohusillo.



- A – Alimentador.
- B – Tolva de alimentación
- C – Extrusor.
- C1 – Control de temperatura y velocidad.
- D – Calandra.
- F – Jalador.
- F1 – Control del jalador.

3.4.3 Propiedades Mecánicas

Se realizaron diferentes pruebas mecánicas acorde a las normas ASTM para estandarizar los procesos experimentales, y así poder analizar la resistencia del material biocompuesto. Para aclarar ciertos términos clave utilizados en el análisis de las pruebas, se presentan las siguientes definiciones generales:

Esfuerzos Mecánicos (Chávez Aguilera, 2010):

- **Tensión:** Esfuerzo producido por dos fuerzas axiales que tratan de alargar al objeto.
- **Compresión:** Esfuerzo producido por dos fuerzas axiales que tratan de aplastar al objeto.
- **Cortante:** Implica fuerzas en sentidos opuestos que tienden a deslizar porciones adyacentes de material una sobre otra.
- **Flexión:** Cuando aplicamos una carga transversal en una pieza adquiere una forma cóncava y aparecen esfuerzos de compresión en la cara interna, tensión en la cara externa y cortante paralelo al eje longitudinal.

Deformación: *Una barra recta cambiará de longitud al cargarla axialmente, volviéndose más larga a tensión y más corta a compresión. Es el cambio por unidad de longitud en una dimensión lineal de una pieza o probeta, normalmente expresado en un porcentaje de deformación; tal como se usa en la mayoría de los ensayos mecánicos, se basa en la longitud original de la probeta* (Instron, 2012).

Resistencia a la tensión: *Cuando un material es estirado por las fuerzas P , los esfuerzos son de tensión. La resistencia a la tensión se refiere a la resistencia de un material al aplicarle una fuerza axial hasta el punto de ruptura* (M. Gere y P. Timoshenko, 1997, pág. 6).

Elasticidad: *Describe una deformación reversible proporcional al esfuerzo, al eliminar el esfuerzo, la deformación desaparece* (Chávez Aguilera, 2010).

Módulo elástico: *El comportamiento elástico se mide con el módulo de elasticidad E , o Módulo de Young, es una forma de medir la rigidez de un material, determinado por la pendiente de la porción recta de la curva de esfuerzo-deformación. Es la razón de cambio de esfuerzo a cambio en la deformación correspondiente.* (Mott, P.E., 1996, pág. 50).

Resistencia a la flexión: *Esfuerzo máximo en la superficie al ejercer una fuerza puntual en la muestra apoyada en dos o más puntos dependiendo del tipo de prueba.*

Módulo de flexión: *Relación del esfuerzo máximo en la fibra con la deformación máxima, dentro del límite elástico del diagrama esfuerzo-deformación* (Glosario de términos para pruebas a materiales, Instron, 2012).

Resistencia a impacto: *Energía necesaria para romper una probeta sometida a una carga de choque* (Glosario de términos para pruebas a materiales, Instron, 2012).

Resistencia a la tensión

Se realizaron pruebas de tensión acorde a la norma ASTM D638, en una máquina Instron 5500R modelo 1125, con una celda de carga de 500Kg y a una velocidad de 5mm/min. Se analizaron 10 probetas para cada formulación. Se seleccionaron las siguientes formulaciones para realizar las pruebas: PLA virgen, PLA enfriado con agua³⁵ y mezclas con un contenido de fibra del 10, 20, 30 y 40%. También se analizaron dos formulaciones con un menor tamaño de fibra, obtenida de la malla 60-fondo, utilizando un porcentaje de contenido del 20 y 30%.

Tabla 22. Formulaciones utilizadas en las pruebas de tensión.

Muestra	PLA (%)	Fibra de Agave (%)	Tamaño de fibra
PLA	100		
PLA/Agua	100 (Enfriado con agua)		
PLA/FAT10	90	10	40 – 60
PLA/FAT20	80	20	40 – 60
PLA/FAT30	70	30	40 – 60
PLA/FAT40	60	40	40 – 60
PLA/FAT20/60f	80	20	60 – fondo
PLA/FAT30/60f	70	30	60 – fondo

Enf Agua: PLA enfriado con agua a la salida del dado de extrusión.
60f: Se refiere al uso de fibra con un tamaño malla 60 – fondo.

Resultados

A continuación se muestran los resultados obtenidos de las pruebas de resistencia a la tensión.

Tabla 23. Resistencia a la tensión del PLA, y diferentes formulaciones del compuesto PLA/FAT.

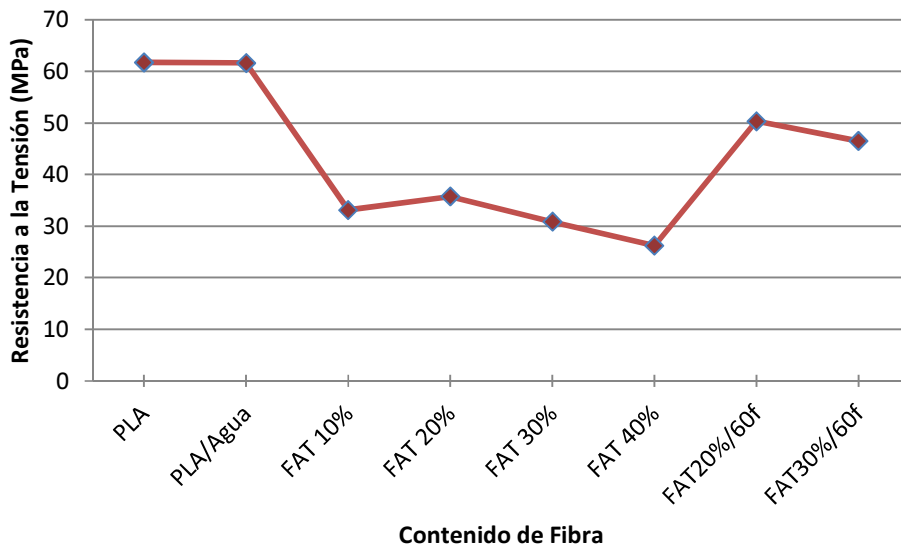
Muestra	Deformación (%)	Resistencia a la Tensión (MPa)	Módulo de Elasticidad (MPa)
PLA	2.61	61.73 ±1.8	3015.42 ±224
PLA/Enf Agua	2.52	61.61 ±3.0	3046.43 ±113
PLA/FAT10	1.43	33.12 ±1.5	2967.12 ±87
PLA/FAT20	1.54	35.73 ±1.0	3066.65 ±118
PLA/FAT30	1.27	30.84 ±2.3	3142.27 ±91
PLA/FAT40	1.03	26.24 ±1.6	3285.15 ±123
PLA/FAT20/60f	1.93	50.32 ±1.4	3497.5 ±257
PLA/FAT30/60f	1.68	46.48 ±4.8	3692.26 ±289

Enf Agua: PLA enfriado con agua a la salida del dado de extrusión.
60f: Se refiere al uso de un tamaño de fibra obtenida tamizando con malla 60 – fondo.

Al analizar las probetas después de las pruebas, nos percatamos de que en todas las formulaciones, la mitad de las probetas o más, presentaban ruptura fuera del área angosta de la probeta, de esta forma los cálculos para obtener el módulo elástico se hicieron a partir de la distancia entre mordazas (115mm).

³⁵ El enfriamiento con agua se realizó mediante una tina colocada en línea con la extrusora, para sumergir el material que se estaba formando a la salida del dado de extrusión.

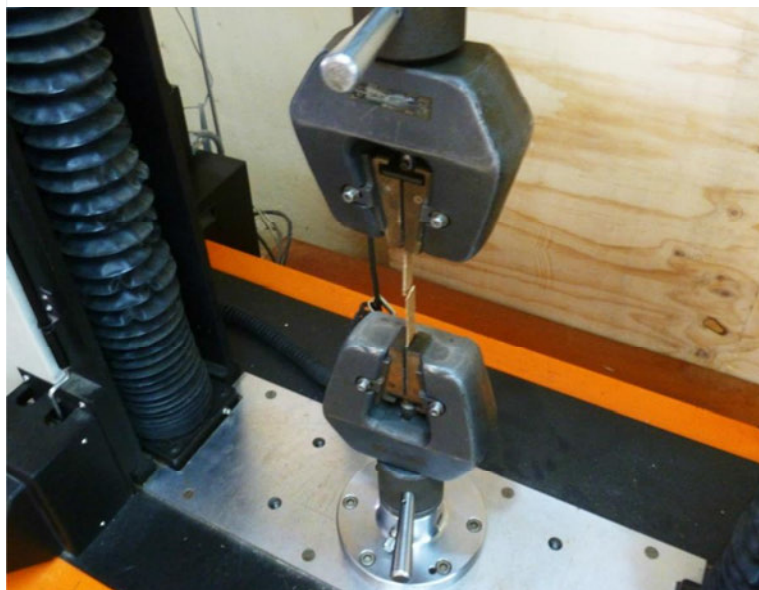
Figura 29. Resistencia a la tensión de las diferentes formulaciones de material compuesto.



Se puede apreciar que la resistencia a la tensión disminuye al aumentar el contenido de fibra, lo cual se traduce en un material más rígido. En relación a los datos obtenidos por Chin-San Wu, en 2011, donde se elaboraron compuestos de PLA reforzados con fibra de sisal, encontramos un comportamiento similar debido a la mala dispersión de las fibras en la matriz de PLA (Wu, 2011).

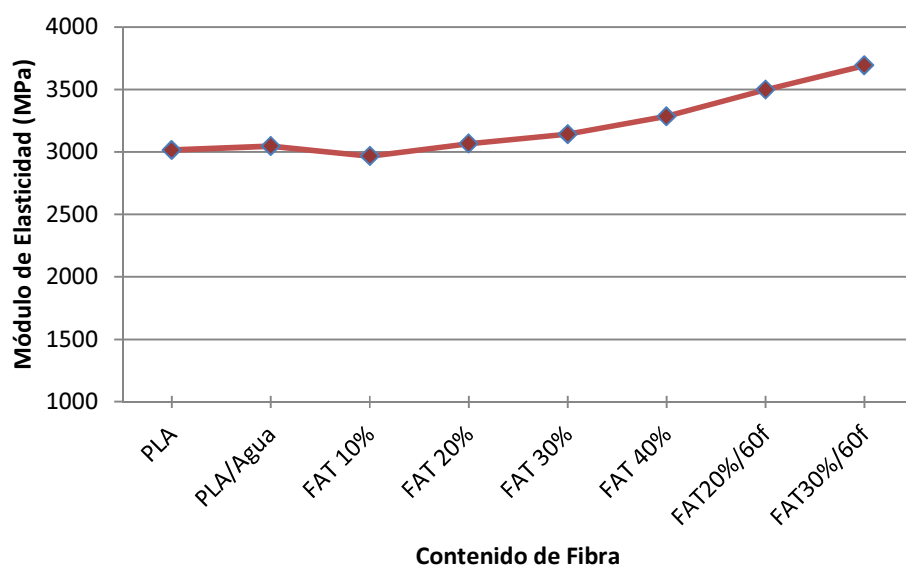
Entre las formulaciones de 10% y 20%, se puede ver primero un ligero aumento de la resistencia a la tensión y después la tendencia a disminuir. Al disminuir el tamaño de fibra en la formulación se logra un aumento del 28.9% de la resistencia a la tensión de la muestra PLA/FAT/20%/60f, en comparación con el valor más alto obtenido en la formulación PLA/FAT20%. En relación al PLA enfriado con agua existe una ligera disminución de la resistencia a la tensión. La disminución del tamaño de la fibra repercute en el aumento de 40.8% de la resistencia a la tensión, comparando el valor más alto obtenido en las formulaciones con el 20% de contenido de fibra en ambos casos.

Figura 30. Ensayo de resistencia a la tensión.



Fuente: Fotografía tomada durante pruebas de tensión, Laboratorio de Procesamiento, CICY.

Figura 31. Módulo de elasticidad del material biocompuesto.



El módulo elástico del PLA aumenta ligeramente al enfriarlo con agua, al agregar el contenido de fibra se aprecia primero una disminución con el 10% de contenido de fibra y después un aumento gradual del módulo. El módulo aumenta 12.3% al disminuir el tamaño de fibra, comparando los datos máximos obtenidos al 40% de contenido de fibra con malla 40-60 (PLA/FAT40), con la muestra al 30% de contenido de fibra con malla 60-fondo (PLA/FAT30/60f).

Acorde a los datos obtenidos de distintas investigaciones, podemos hacer una comparación entre diversos compuestos reforzados con fibras naturales. Se incluye la información de cuatro formulaciones elaboradas con 20 y 30% de concentración de fibra, ya que coincide con el contenido de fibra que se reporta en diferentes investigaciones.

Tabla 24. Comparación de propiedades del biocompuesto PLA/FAT con otros biocompuestos reforzados con fibras naturales.

Material	Resistencia a la Tensión (Mpa)	Fuente
PLA/FAT 20%	35.73	Canché, Duarte, Echeverría Arjonilla, 2012.
PLA/FAT 30%	30.84	Canché, Duarte, Echeverría Arjonilla, 2012.
PLA/FAT 20%/60f	50.32	Canché, Duarte, Echeverría Arjonilla, 2012.
PLA/FAT 30%/60f	46.48	Canché, Duarte, Echeverría Arjonilla, 2012.
PLA/Sisal 30%	56.68	Zhaoqian Li, Xiaodong Zhou, Chonghua Pei. 2011.
PP/FH 20%	22	Balam Cocom, Duarte, Canche, 2006.
PLA/Si69FP 30%	34.44	P.J. Jandas, S. Mohanty, et al. 2011.
PLA/Lino 30%	50	K. Oksman, M. Skrifvars, J. F. Selin, 2003.

Fuente: Información a partir de distintas investigaciones en la elaboración de materiales biocompuestos reforzados con fibras naturales.

PLA – Datos obtenido en la experimentación.

PP – Polipropileno.

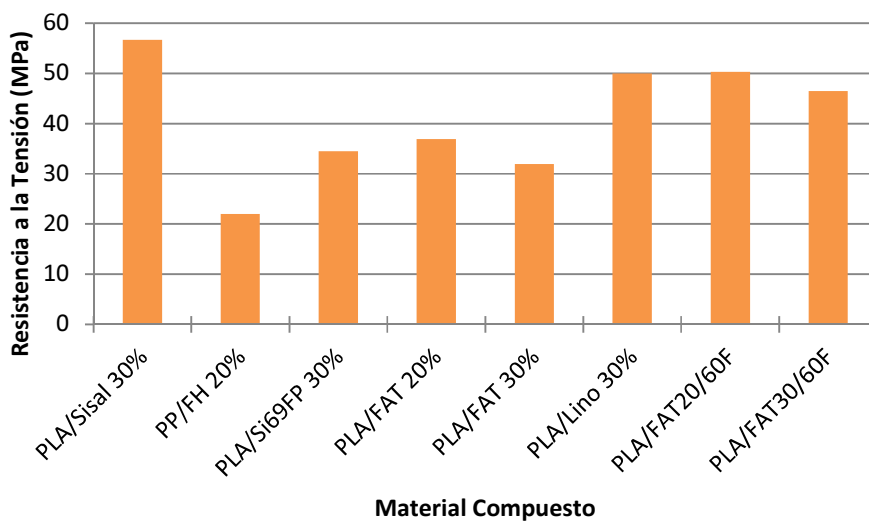
FP – Fibra de plátano.

Si69FP – Fibra de plátano tratada con agente de acoplamiento silano, aminopropiltriethoxisilano (APS)

FH – Fibra de henequén.

Se puede apreciar claramente que en comparación con los biocompuestos reforzados con fibra de sisal y lino, la resistencia a la tensión del material biocompuesto PLA/FAT es considerablemente menor, lo cual puede estar relacionado con la procedencia de la fibra. En relación al compuesto de polipropileno con fibra de henequén, podemos observar que el compuesto PLA/FAT tiene una mayor resistencia a la tensión. Al disminuir el tamaño de fibra se logra un aumento considerable en la resistencia a la tensión, acercándose a los valores obtenidos en los materiales biocompuestos con PLA y lino, así como los de PLA y sisal.

Figura 32. Comparación de la resistencia a la tensión entre algunos materiales biocompuestos reforzados con fibras naturales.



La comparación de la resistencia a la tensión del biocompuesto con otros termoplásticos petroquímicos nos permite tener un marco de referencia en relación a materiales comunes utilizados en una gran variedad de productos. La poca capacidad de deformación a la ruptura nos habla de la rigidez en comparación con los otros materiales. Las propiedades son similares a las del Poliestireno, con mayor resistencia a la tensión y menor rigidez.

Tabla 25. Comparación de propiedades del PLA, compuesto PLA/FAT y algunos plásticos petroquímicos comunes.

Propiedad	PLA	PLA/FAT 20%	PLA/FAT 30%	PS	PVC	PP
Resistencia de Tensión a la Cedencia (MPa)	60	35.73	30.84	24.5	57.4	35.9
Deformación (%)	6	1.54	1.27	2.5	20	98
Módulo de Elasticidad (MPa)	3500	3066.65	3142.27	3400	4830	1400

Fuente: (Plastics from microbes: microbial synthesis of polymers and polymer precursors, 1994) y datos obtenidos en la experimentación.

PLA – Datos obtenidos del fabricante.

PVC - Datos equivalentes a grado de extrusión (No se especifica método).

PP - Bapolene® 4012 Polipropileno, grado de extrusión (ASTM D638).

PS - Bapolan® 6403 Poliestireno grado de extrusión (ASTM D638).

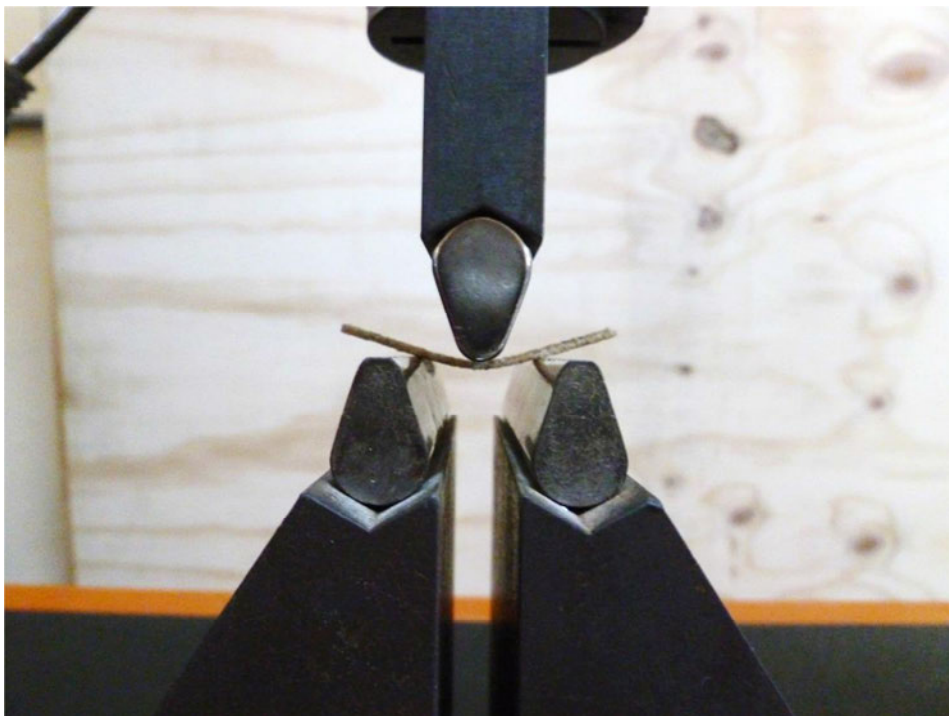
Resistencia a la flexión

Se realizaron pruebas de flexión a tres puntos acorde a la norma ASTM 790, en una máquina Instron 5500R modelo 1125. Se utilizó con una celda de carga de 500Kg, a una velocidad de 0.0672 mm/min y con una separación entre puntos de 25.4mm y 27.6mm en relación a lo que exige la norma en función del espesor de las probetas. Se elaboraron 10 probetas para cada formulación, utilizando formulaciones con un contenido de fibra del 10, 20, 30 y 40%, con un tamaño de fibra malla 40-60. También se hicieron pruebas con PLA virgen y PLA enfriado con agua.

Tabla 26. Formulaciones utilizadas en las pruebas de flexión.

Muestra	PLA (%)	Fibra de Agave (%)
PLA	100	
PLA/Agua	100 (Enfriado con agua)	
PLA/FAT10	90	10
PLA/FAT20	80	20
PLA/FAT30	70	30
PLA/FAT40	60	40

Figura 33 Ensayo de resistencia a la flexión.



Fuente: Fotografía tomada durante las pruebas de flexión, Laboratorio de Procesamiento CICY.

Resultados

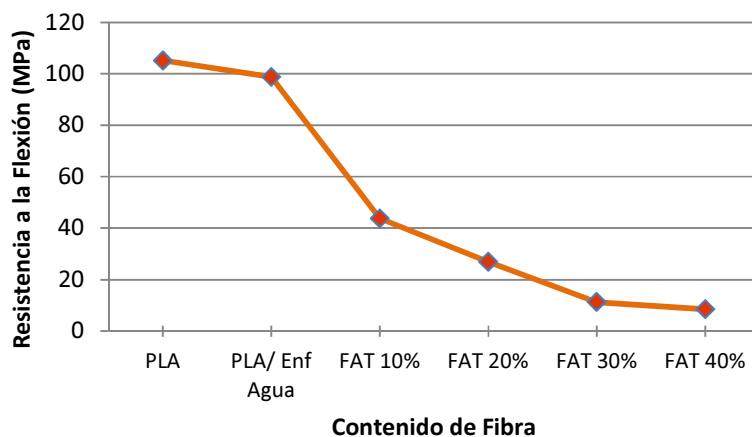
A continuación se presentan los resultados obtenidos de los ensayos de flexión, en relación a los datos obtenidos, las probetas que presentaron datos muy por debajo o arriba de la media fueron descartadas.

Tabla 27. Resistencia a la flexión de diferentes formulaciones de material compuesto.

Muestra	Resistencia a la Flexión (MPa)	Esfuerzo máximo en la fibra (MPa)	Módulo de Flexión (MPa)
PLA	105.15 ±3.3	107.53	4793.85 ±233
PLA/Agua	98.75 ±1.3	108.28	4946.29 ±161
PLA/FAT10	43.79 ±9.8	59.20	2529.53 ±322
PLA/FAT20	26.91 ±3.5	68.96	3367.02 ±234
PLA/FAT30	11.25 ±0.8	57.29	3158.24 ±159
PLA/FAT40	8.48 ±2.0	50.99	3233.12 ±175

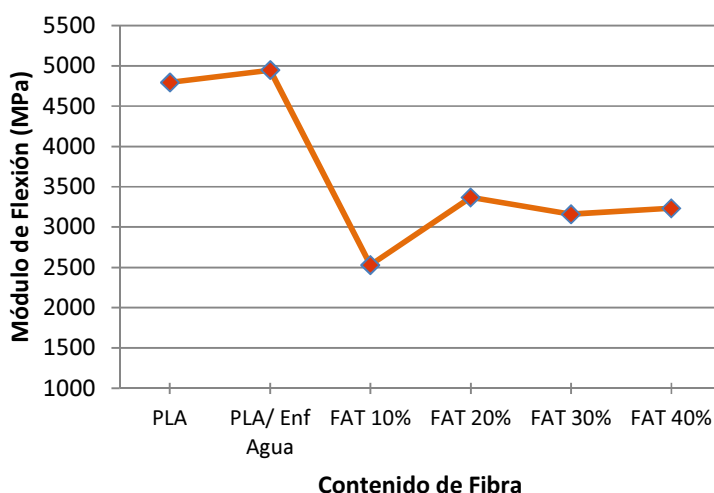
PLA/Agua: PLA virgen enfriado con agua a la salida del dado de extrusión.

Figura 34. Resistencia a la flexión de diferentes formulaciones de material compuesto.



Se puede apreciar un comportamiento similar al que muestran los resultados de los ensayos de tensión, al aumentar el contenido de fibra la resistencia a la tensión disminuye. En el caso del PLA enfriado con agua también podemos observar una disminución de 6.09% en la resistencia comparado con el PLA enfriado con aire. La flexibilidad del PLA se ve afectada al agregar el contenido de fibra, esto se puede deber a causa de una mala distribución de las fibras en la matriz. En el análisis de los materiales de PLA y fibra de sisal obtenidos por Li, Zhou, y Pei (2011), se registra una resistencia a la flexión de casi 100MPa en una mezcla con un contenido de fibra de sisal del 30%, al compararlo con la resistencia de 11.2MPa del biocompuesto PLA/FAT30 es evidente la pérdida de propiedades del material, lo cual varía considerablemente tomando en cuenta que también se utiliza fibra de un agave. Estos resultados demuestran que no se pueden dar por sentadas las propiedades de un material haciendo comparaciones en relación a otros materiales fabricados con materias primas similares, sólo mediante la experimentación y el análisis se puede determinar con certeza las propiedades de un material.

Figura 35. Módulo de flexión de las diferentes formulaciones de material compuesto.



El módulo del material aumenta 3.17% al comparar el PLA virgen y el PLA enfriado con agua. El valor más bajo se obtiene con el contenido de fibra del 10%.

Resistencia al impacto

Se realizaron pruebas de resistencia al impacto utilizando muestras que consistieron en probetas rectangulares con las dimensiones adecuadas para ensayos de impacto Izod, de acuerdo a la norma ASTM D256. Las muestras se acondicionaron 24 h previas al ensayo. Se realizó la elaboración de las probetas mediante el moldeo por compresión, en una prensa hidráulica Carver, a 4500Kg de presión y una temperatura de 180°C, utilizando un molde de acero. De cada formulación se contaba con 10 probetas de las cuales se tomó una de cada cual para realizar una prueba preliminar sin hacer muesca y se ensayaron. El equipo utilizado fue un péndulo de impacto CEAST, con un martillo de 1J.

Tabla 28. Formulaciones utilizadas en las pruebas de impacto.

Muestra	PLA (%)	Fibra de Agave (%)
PLA	100	
PLA/FAT10	90	10
PLA/FAT20	80	20
PLA/FAT30	70	30
PLA/FAT40	60	40

Resultados preliminares

Como se observa en la **Tabla 29** la energía absorbida por la muestra de solo PLA es mayor al 85% que establece la norma. Con base en estos resultados se decide realizar la muesca en todas las probetas para todas las formulaciones.

Tabla 29. Energía absorbida al impacto de materiales compuestos.

Muestra	Energía absorbida (%)
PLA	98
PLA/FAT10	72
PLA/FAT20	70
PLA/FAT30	62
PLA/FAT40	51

Resultados

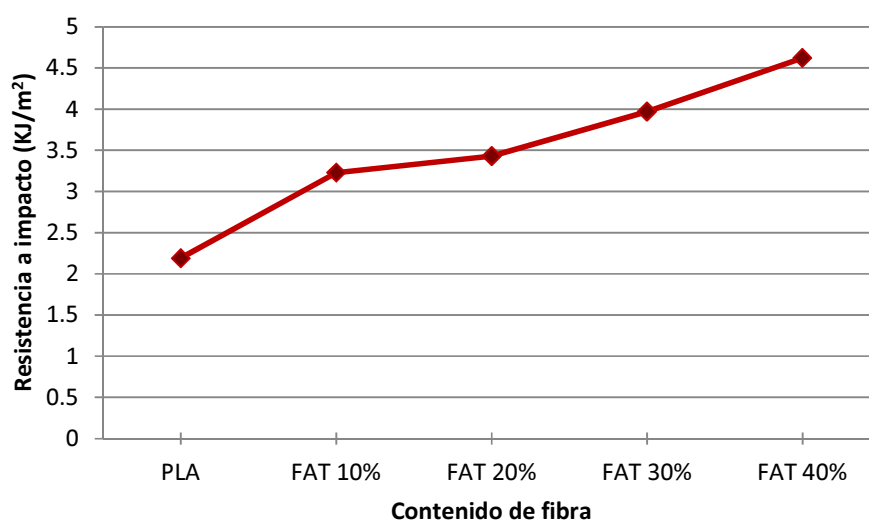
En la **Tabla 30** se resumen los resultados de resistencia al impacto de los materiales compuestos así como el porcentaje de energía absorbida por las muestras.

Tabla 30. Energía absorbida al impacto del biocompuesto PLA/FAT.

Muestra	Resistencia a Impacto		Energía absorbida (%)
	(KJ/m ²)	(J/m)	
PLA	2.19 ± 0.48	22.27 ± 4.91	18.60 ± 1.50
PLA/FAT10	3.23 ± 0.27	32.77 ± 2.78	18.60 ± 1.51
PLA/FAT20	3.43 ± 0.15	34.80 ± 1.51	20.91 ± 1.03
PLA/FAT30	3.97 ± 0.37	40.38 ± 3.71	22.93 ± 1.87
PLA/FAT40	4.62 ± 0.42	46.92 ± 4.23	27.60 ± 2.17

Resistencia a impacto Izod con muesca.

Figura 36. Resistencia a impacto de las diferentes formulaciones.

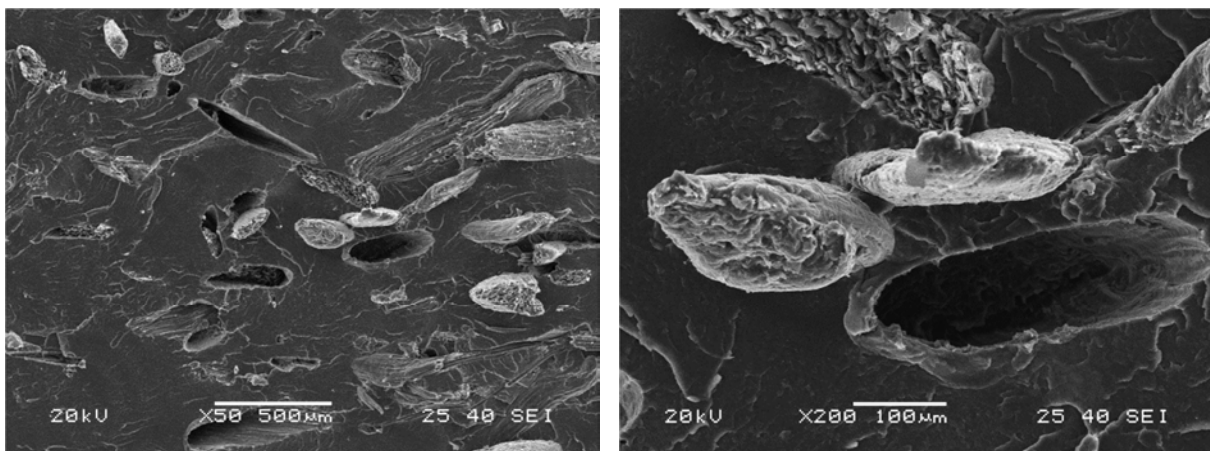


Se puede apreciar un aumento de la energía absorbida en relación al aumento en el contenido de fibra de agave en la matriz, por lo tanto un aumento en la resistencia al impacto. Comparando la formulación de PLA virgen con la de PLA/FAT40, se observa un aumento de 52.5% en la resistencia. En la literatura encontramos datos que reportan un incremento en la resistencia a impacto en compuestos reforzados con fibra comparados con el PLA virgen, como es el caso de los compuestos con PLA y fibra de abacá, con una resistencia de 5.3KJ/m² (prueba A-notch Charpy) (K. Bledzki, Jaszkiwicz, y Scherzer, 2008). De igual manera Yu Tao et al., (2009) reportan un incremento en la resistencia a impacto en relación con el aumento en el contenido de fibra, en compuestos con PLA y fibra de yute y ramio, moldeados por compresión, alcanzando su máximo de resistencia en la muestra con 30% de fibra. En el caso del

biocompuesto PLA/FAT la resistencia a impacto sigue aumentando al agregar 40% de contenido de fibra de agave. Li, Zhou, y Pei, en el 2011 reportaron el mismo comportamiento en un compuesto de PLA con fibra de sisal, en el cual la resistencia al impacto (prueba Izod con muesca) es mayor en comparación con la matriz de PLA, obteniendo una resistencia de 3.2KJ/m^2 para una mezcla con un contenido de fibra de sisal del 30%, siendo similar a la resistencia de 3.9KJ/m^2 del biocompuesto PLA/FAT30.

La fibra como agente reforzante mejora la resistencia a impacto de un material compuesto, ya que aumenta la energía que se requiere para desplazarla de su lugar. La tenacidad es el factor que controla la resistencia al impacto, esta depende de la fibra, la matriz y la fuerza de unión en la interfaz (Tao, Yan, y Jie, 2009). El comportamiento que presenta el biocompuesto se puede deber a la disipación de la energía de impacto por la fricción requerida para zafar las fibras de la matriz (*pull-out*) y que aumenta al incrementar el contenido de fibra en el material (Canché Escamilla, Duarte Aranda, y Echeverría Arjonilla, 2012). Se puede apreciar en la **Figura 37** los huecos que quedan por el desprendimiento de las fibras.

Figura 37. Microfotografías de SEM de superficie de fractura al impacto de materiales biocompuestos PLA/FAT.



Fuente: Santiago Duarte Aranda, laboratorio SEM, CICY, 2012.

3.4.4 Densidad

La densidad (ρ) es una magnitud escalar que se refiere a la cantidad de masa (m) contenida en un determinado volumen (V), se utilizó la siguiente fórmula para realizar el cálculo:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Se determinó la densidad de cinco muestras del biocompuesto elaboradas por moldeo por compresión, debido a su calidad homogénea y dimensiones adecuadas para hacer la medición. En la **Tabla 31** se puede apreciar que la densidad del material incrementa conforme se aumenta el contenido de fibra.

Tabla 31. Densidad de biocompuesto PLA/FAT.

Muestra	Densidad (g/cm ³)
Fibra de bagazo de agave	1.45
PLA	1.24
PLA/FAT10	1.27
PLA/FAT20	1.28
PLA/FAT30	1.29
PLA/FAT40	1.32

La densidad del biocompuesto PLA/FAT nos indica que se hunde la colocarlo en agua. En la **Tabla 32** podemos observar las variaciones de densidad de algunos materiales comunes en relación con el biocompuesto PLA/FAT. La densidad del biocompuesto PLA/FAT es mayor a la de los polímeros petroquímicos ejemplificados, lo cual significa un mayor peso al comparar volúmenes equivalentes. En este sentido la fibra de bagazo de agave tiene una ventaja comprada, por ejemplo con la fibra de vidrio, la cual es más densa incluso que el biocompuesto PLA/FAT.

Tabla 32. Densidad del biocompuesto PLA/FAT en comparación con distintos materiales.

Material	Densidad (g/cm ³)
PLA/FAT30	1.29
PLA	1.24
Madera de pino Douglas	0.48 -0.56
Fibra de Vidrio	2.6
Resina Epóxica moldeada	1.91
Nylon 6/6	1.135
ABS	.995
PET	1.34
PE	0.915
PP	0.9
Acero (alto carbono)	7.49

Fuente: Tabla elaborada a partir de la información de distintas referencias: consulta en Internet Matweb, (Gere y Timoshenko, 1997), (Mott, P.E., 1996).

3.4.5 Propiedades Térmicas

Las propiedades térmicas de un material nos permiten conocer las temperaturas de transición, que indican cambios morfológicos y químicos. Estas propiedades nos permiten saber cómo se comportará el material bajo ciertas condiciones de temperatura y sus variaciones. Se presentan las siguientes definiciones generales para aclarar términos utilizados en adelante:

Calor: Es la transferencia de energía térmica ocasionada por una diferencia de temperatura. El flujo de calor es una transferencia de energía que se lleva a cabo como consecuencia de las diferencias de temperatura. El calor se transmite del sistema de mayor temperatura al de menor (e-URE, 2012).

Endotérmico: Es un cambio en el cual el sistema recibe energía térmica (Real Academia Española, 2013).

Exotérmico: Es un cambio en el cual el sistema emite energía térmica (Real Academia Española, 2013).

Temperatura de transición vítrea (T_g): Es la temperatura por debajo de la cual un polímero aumenta su densidad, dureza y rigidez, además su porcentaje de elongación disminuye de forma drástica. Por encima de la T_g el polímero se torna gomoso y adquiere cierta elasticidad y capacidad de deformación plástica sin fractura. (Universidad Nacional de Luján Departamento de Ciencias Básicas, 2012).

Temperatura de cristalización (T_c): Es la temperatura en la cual se presenta un flujo exotérmico máximo, indicando la cristalización de un material.

Temperatura de fusión (T_m): Es la temperatura en la cual se transforma un material del estado sólido al líquido.

Análisis Termogravimétrico (TGA): El TGA se utiliza para determinar la pérdida de masa en una atmósfera controlada, ya sea en función del aumento de la temperatura o en función del tiempo. La representación de la masa o del porcentaje de masa en función del tiempo o de la temperatura se denomina termograma o curva de descomposición térmica.

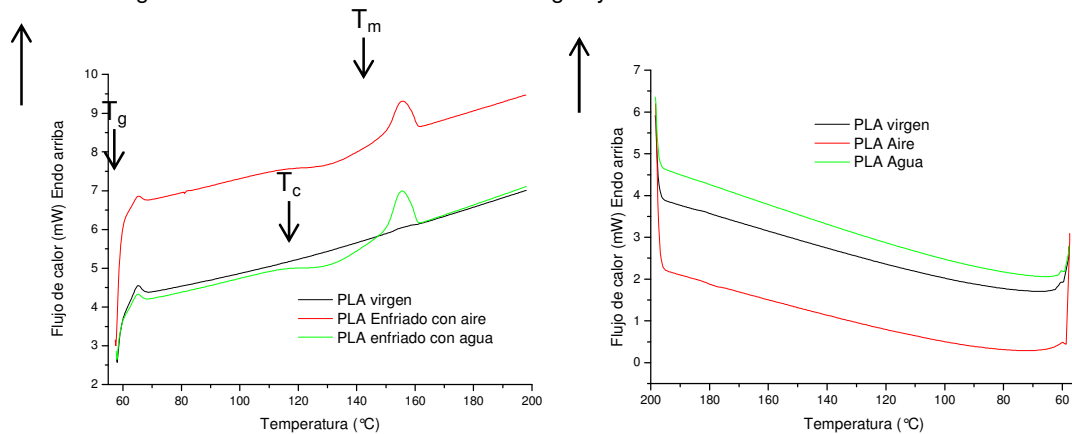
Calorimetría de Barrido Diferencial (DSC): Es una técnica en la cual se analiza la diferencia en la tasa del flujo de calor en la muestra y a una muestra de referencia al someterlas a una alteración de la temperatura.

DSC

Se empleó un DSC Diamond haciendo un barrido de temperatura de 55 a 200°C a 10°C/min, en atmósfera de nitrógeno, efectuando un barrido previo de calentamiento para eliminar el historial térmico de las muestras.

El PLA virgen corresponde al material sin procesar obtenido del fabricante (pellets), el PLA enfriado con aire (PLA/Aire) o agua (PLA/Agua), se refiere al material extruido en láminas al cual se le aplicó alguno de los métodos de enfriamiento. El flujo de calor endotérmico se indica en los termogramas con una flecha, en este caso corresponde hacia arriba.

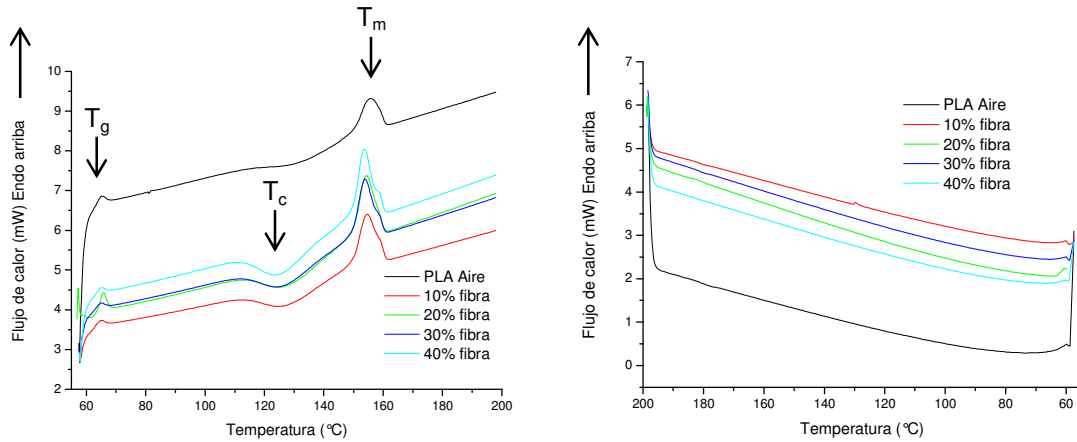
Figura 38. Termogramas de DSC de muestras de PLA virgen y extruido.



Acorde a lo reportado por Zhang et al., la temperatura de transición vítrea (T_g) del PLA se encuentra a los 59.7°C, la temperatura de cristalización (T_c) a los 93.4°C y la temperatura de fusión (T_m) a los 164.6 (Zhang, Shi, Nie, Wang, y Yang, 2012). En los datos obtenidos por X. Cao et al., existe una ligera variación encontrando una $T_g = 61.8^\circ\text{C}$. X. Cao et al. destacan que el PLA no cristaliza durante el enfriamiento, en lugar de eso la muestra cristaliza durante el calentamiento, entre una temperatura de 111 y 147°C, con un pico en $T_c = 127^\circ\text{C}$. La fusión de la cristalinidad recuperada es inmediata indicada por el flujo de calor con una temperatura máxima $T_m = 157^\circ\text{C}$ (X., A., S.H., J.L., y D.J., 2003). Este comportamiento se puede apreciar de manera similar conforme a los resultados obtenidos en el termograma de la **Figura 38**, donde el flujo de calor es estable durante el enfriamiento.

Dentro de los resultados obtenidos, en el proceso de calentamiento se aprecia una T_g a partir de los 60°C a los 65°C, lo cual coincide con las diferentes variaciones de PLA. En las curvas correspondientes al PLA/Aire y PLA/Agua, podemos apreciar una ligera curva exotérmica a partir de los 120°C, lo cual se puede interpretar como la cristalización de las muestras, lo cual refleja que la cristalización se presenta una vez que ha sido procesado el PLA. En la formulación PLA/Agua se puede observar una acentuación en el flujo exotérmico de calor, lo cual puede representar una mejor cristalización en relación al PLA/Aire. En relación a la temperatura de fusión, no se logra distinguir un pico endotérmico en la curva que corresponde al PLA virgen. Para el PLA/Aire se obtuvo una $T_m = 155.7^\circ\text{C}$ y para el PLA/Agua $T_m = 155.6^\circ\text{C}$.

Figura 39. DSC de materiales biocompuestos PLA/FAT y diferente contenido de fibras de Agave tequilana.



En la literatura podemos encontrar valores registrados para un compuesto de PLA reciclado y un contenido de 30% de fibra de sisal, reportando una temperatura de transición vítrea (T_g) de 59.6°C y una temperatura de fusión (T_m) de 153.1°C (Wu, 2011).

En relación a las formulaciones con un contenido de fibra, en la **Figura 39** se puede apreciar que la temperatura de transición vítrea comienza de los 55 a 60°C, la cual es similar al comportamiento de los compuestos analizados de PLA y fibra de sisal. Se observa un flujo de calor exotérmico que corresponde a la cristalización a partir de los 110°C, lo cual se aprecia de manera sutil para el PLA y se acentúa más en las formulaciones con un contenido de fibra.

Tabla 33. Efecto de la fibra de agave tequilero en las propiedades térmicas del biocompuesto PLA/FAT

Muestra	Temp. de transición vítrea (°C)	Temp. de cristalización (°C)	Temp. de fusión (°C)
PLA/Aire	65.4	123	155.7
PLA/FAT10	65	124.2	154.7
PLA/FAT20	65.6	124.5	154.5
PLA/FAT30	65.2	123.9	153.8
PLA/FAT40	65.3	123.6	153.5

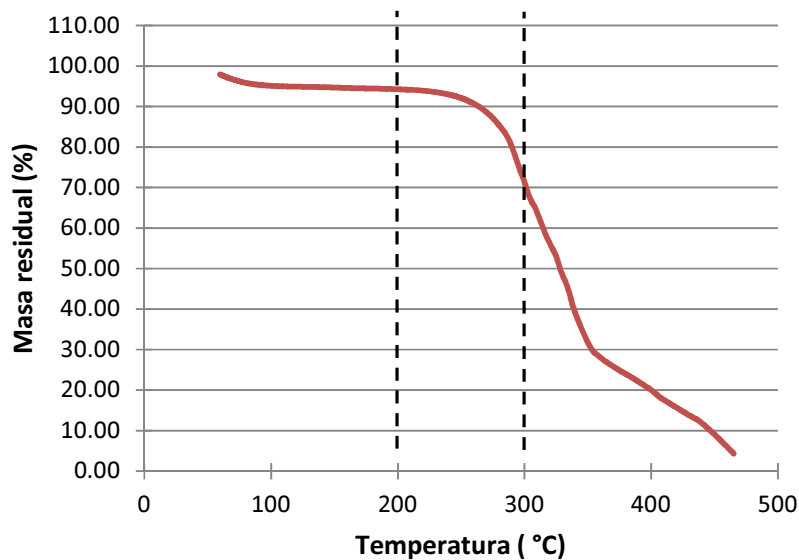
La temperatura de fusión se encuentra a partir de los 150°C, lo cual no presenta una gran variación entre las diferentes formulaciones. La muestra con un 30% de fibra de agave presenta una $T_m = 153.8^\circ\text{C}$, la cual es similar a la que reporta Wu (153.1°C). Se puede observar una diferencia en el flujo de calor que se acentúa al aumentar el contenido de fibra. De igual manera que el PLA virgen se aprecia un flujo de calor estable durante el enfriamiento. El aumento en el contenido de fibra disminuye ligeramente la temperatura de fusión, hasta 2.2°C, comparando el PLA/Aire con la muestra con un contenido de fibra del 40%.

La temperatura de transición vítrea del material biocompuesto, en promedio en el rango de los 50 a los 65°C, nos indica uno de los límites para su aplicación. Aun cuando no corresponde a una temperatura en la cual exista un cambio de estado, puede implicar el inicio de la transición hacia un cambio de fase. Al acercarse a los 110°C, momento en el cual empieza la cristalización del compuesto puede haber una afectación a las propiedades mecánicas del material.

TGA

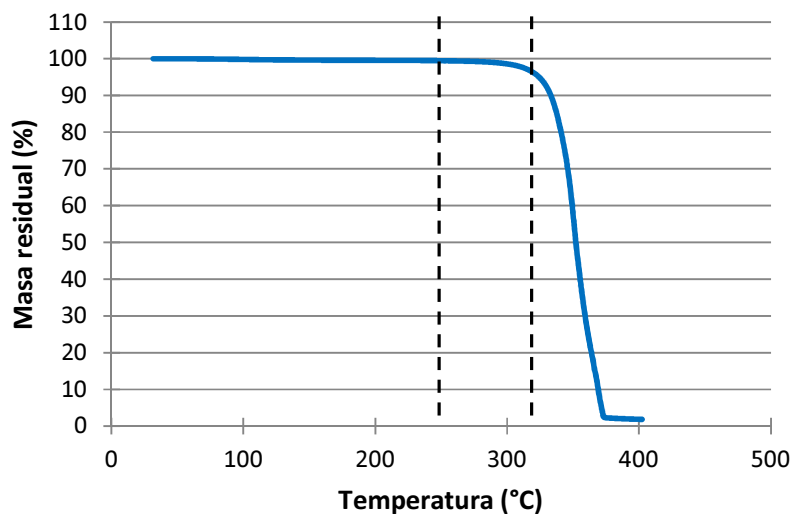
La estabilidad térmica del material biocompuesto fue investigada mediante la elaboración del análisis TGA, se utilizó un instrumento 2950 TGA HR, con una velocidad de calentamiento de 10 °C por minuto en una atmósfera de nitrógeno. Para las muestras de fibra de bagazo de agave se puede apreciar que a partir de los 200 °C se muestra una descomposición principal con un decremento notable de pérdida de masa, menos del 50%, a partir de los 254 °C, a causa de la degradación térmica de la celulosa. Al alcanzar los 350 °C se aprecia la segunda etapa de degradación de la celulosa y la degradación de la lignina.

Figura 40. Termograma del TGA de las fibras de bagazo de agave.



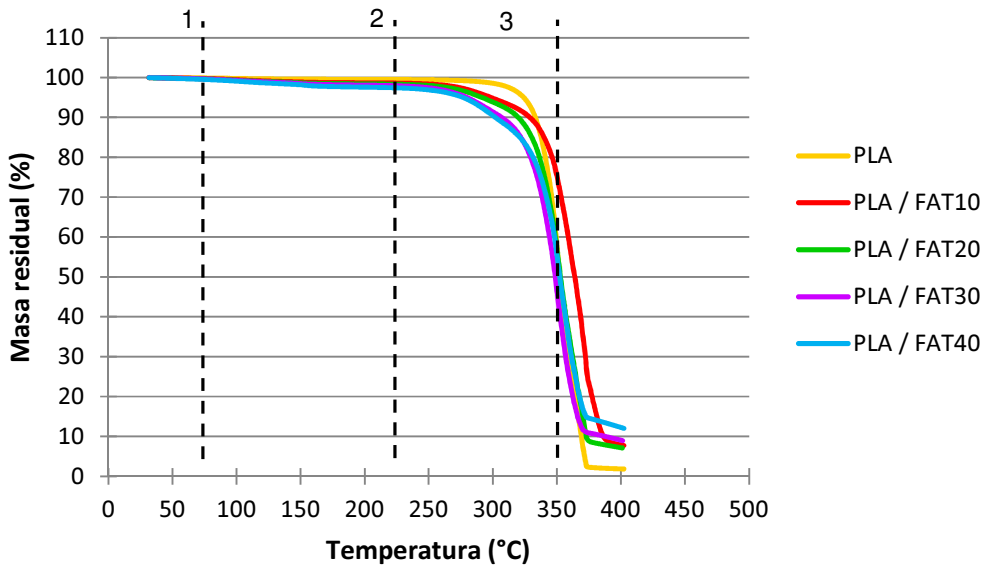
En la **Figura 41** se presenta el termograma del PLA extruido donde se muestra que comienza a degradarse a mayor temperatura comparado con las fibras de agave, aprox. 50 °C más que las fibras.

Figura 41. Termograma del TGA del PLA extruido.



Al comparar los termogramas de las diferentes muestras del biocompuesto (**Figura 42**), y la matriz de PLA, se puede apreciar una descomposición principal en el rango de los 250 – 400 °C. A partir de 100 °C comienza una ligera pérdida de masa, lo cual se aprecia más estable para el caso de la muestra de PLA. Se puede observar que a partir de los 250 °C empieza a acelerarse la pérdida de masa, incrementándose de manera radical al alcanzar una temperatura dentro de un rango de 317 – 327 °C. La mezcla con la matriz de PLA aporta a las fibras de agave mejores propiedades térmicas, sin embargo no se incrementan las propiedades para el biocompuesto ya que son muy similares a las propiedades de la matriz de PLA.

Figura 42. TGA del PLA y diferentes muestras del biocompuesto PLA/FAT.



Las investigaciones realizadas acerca de otros materiales biocompuesto reforzados con fibras naturales, demuestran resultados similares, como los materiales de fibra de bambú, madera, y coco, con PLA, analizados por Zhang, et al. (2012), describiendo tres etapas principales de degradación: 1) La humedad absorbida durante el almacenamiento es liberada de las fibras a casi 100 °C. 2) La segunda transición ocurre de 300 a 370 C°, al degradarse las fibras naturales. 3) Después de 370 °C, los compuestos empiezan a descomponerse térmicamente.

En el caso del biocompuesto PLA/FAT, se puede observar que efectivamente la primera etapa de degradación comienza a los 100 °C. La segunda etapa aparenta ocurrir a partir de los 250 °C a los 325 °C, en el caso de la fibra de agave a los 300 °C hay un 30% de pérdida de masa, pero la unión con el PLA permite compensar esta pérdida ya que a esta temperatura los materiales presentan una pérdida del $\pm 10\%$ de masa. La tercera etapa de degradación se aprecia a partir de los 350 °C. En la investigación realizada por Yu Tao et al. (2009) se exponen los resultados del análisis térmico de biocompuestos de yute y ramio con PLA. Se aprecia un comportamiento similar al biocompuesto PLA/FAT, al iniciar la degradación a partir de los 250 °C y una degradación completa después de los 350 °C.

A partir de los resultados obtenidos se puede afirmar que no existe una modificación sustancial de la degradación térmica del material biocompuesto al agregar un mayor contenido de fibra. En el caso de las fibras de agave existe una mayor resistencia a la degradación gracias a la sinergia con el PLA. El material biocompuesto obtenido demuestra buenas propiedades térmicas en general, lo cual implica la posibilidad de considerar distintas aplicaciones.

3.4.6 Absorción de Agua

Se realizó una prueba de absorción de agua tomando como referencia la norma ASTM D 570 utilizando el método de inmersión larga, en el cual se estableció la primera medición después de 48 horas y las siguientes mediciones se realizaron cada semana. Se elaboraron muestras de 7.62cm de largo por 2.54cm de ancho a partir de las láminas extruidas. Se mantuvo las muestras a una temperatura ambiente de 24 °C antes de la prueba, se sumergieron completamente en un recipiente con agua destilada a una temperatura ambiente de 21.9 °C que varió hasta los 23.3 °C.

Para realizar las mediciones se secó el agua superficial de las muestras antes de pesarlas individualmente. La primera medición se realizó a las 48 horas después de haber sido sumergidas, la segunda después de una semana a partir del primer día de prueba.

Tabla 34. Formulaciones utilizadas en las pruebas de absorción de agua.

Muestra	PLA (%)	Fibra de Agave (%)	Tamaño de fibra
PLA	100		
PLA/FAT10	90	10	40-60
PLA/FAT20	80	20	40-60
PLA/FAT30	70	30	40-60
PLA/FAT40	60	40	40-60
PLA/FAT20C	80	20	40-60
PLA/FAT30C	70	30	40-60
PLA/FAT20/60f	80	20	60-fondo
PLA/FAT30/60f	70	30	60-fondo

Las formulaciones con la terminación C (ejemplo PLA/FAT20C), se refieren a aquellas muestras en las cuales se obtuvo un acabado más liso por el uso de una calandra de dos rodillos en la salida del dado de extrusión. Las formulaciones con la terminación 60f corresponden a aquellas en las que se utilizó un menor tamaño de fibra, al tamizar con una malla 60-fondo.

Al realizar la primera medición nos percatamos que las muestras comenzaban a perder peso a un ritmo considerable una vez colocadas en la báscula. De esta manera se decidió tomar la primera medición al colocar la muestra, y tomar una segunda medición 3 min después, para así comparar las variaciones en los resultados. El peso de las muestras se comenzaba a estabilizar después de un tiempo, pero aun así seguía disminuyendo a un ritmo más lento. Este comportamiento puede relacionarse con la evaporación de la humedad acumulada en la superficie debido a la distribución de las fibras en la matriz, ya que en el caso de la muestra de PLA, la pérdida de peso demostró ser menor y discontinua (**Tabla 35**). En cambio en la muestra de PLA/FAT40 fue notoria la acelerada pérdida de peso con el paso del tiempo.

Para obtener el porcentaje de aumento de peso de las muestras se utilizó la siguiente ecuación:

$$\text{Aumento de peso (\%)} = \frac{P_h - P_i}{P_h} \times 100$$

Donde P_i corresponde al peso inicial de la muestra y P_h al peso húmedo.

Para realizar la comparación en el porcentaje de aumento de peso de las diferentes formulaciones se tomará el primer peso medido después de extraer las muestras del recipiente, ya que así lo indica la norma.

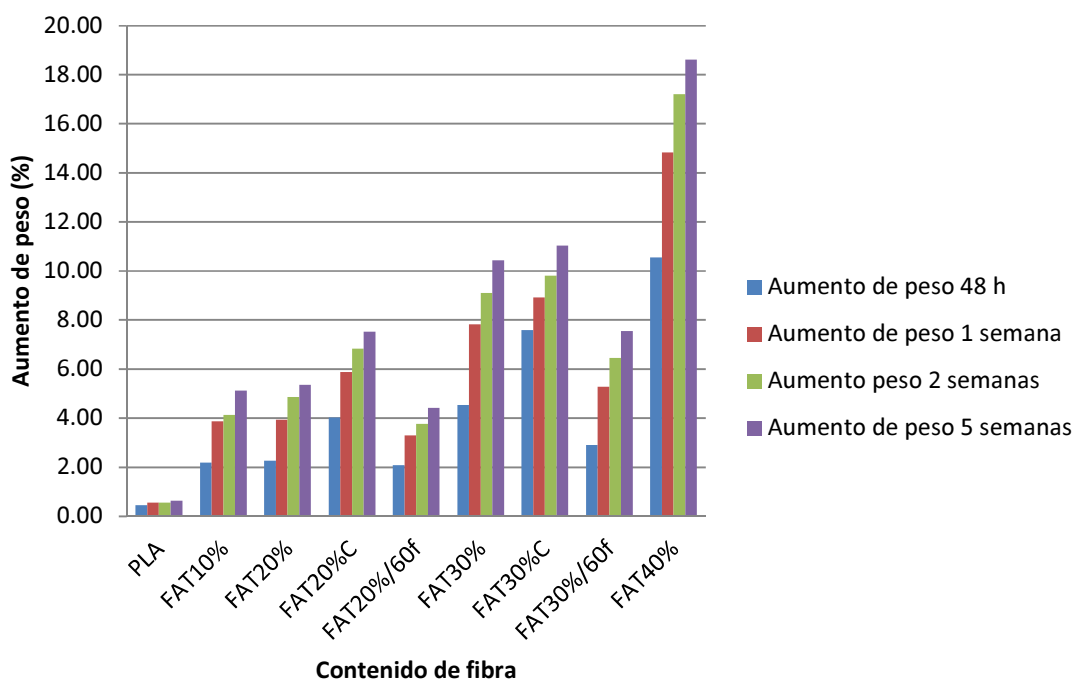
Tabla 35. Comparación entre pesos obtenidos de las muestras después de 48 horas.

Formulación	Peso inicial (g)	Peso húmedo (g) 48h	Aumento de peso (%)	Peso húmedo (g) 48h/3min después	Aumento de peso (%) 3 min
PLA	3.0859	3.1	0.46	3.0986	0.41
PLA/FAT10	3.3273	3.4001	2.19	3.3881	1.83
PLA/FAT20	3.3558	3.4316	2.26	3.4192	1.89
PLA/FAT30	3.3835	3.5368	4.53	3.4928	3.23
PLA/FAT40	4.0271	4.4522	10.56	4.2406	5.30
PLA/FAT20C	2.5033	2.604	4.02	2.5771	2.95
PLA/FAT30C	2.2532	2.4243	7.59	2.3459	4.11
PLA/FAT20/60f	3.3413	3.411	2.09	3.4042	1.88
PLA/FAT30/60f	2.6163	2.6925	2.91	2.6838	2.58

El aumento en el contenido de fibra en la matriz representa una mayor absorción de agua del biocompuesto PLA/FAT. En relación a las variaciones de las muestras que corresponden al 20 y 30% de contenido de fibra, podemos observar que la disminución del tamaño de la fibra disminuye la absorción de agua. Si tomamos como referencia las muestras con un 30% de contenido de fibra, notamos que después de 48 horas la muestra PLA/FAT30/60f absorbió 35.7% menos agua en relación con la muestra PLA/FAT30. Después de 1 semana absorbió 32.5% menos.

En relación a la comparación del porcentaje de absorción con el paso del tiempo, podemos apreciar que después de una semana, las muestras del material siguen ganando peso, lo cual indica que no se puede afirmar que las muestras han alcanzado la saturación.

Figura 43. Comparación de aumento de peso por la absorción de agua del biocompuesto PLA/FAT.



FAT% – Porcentaje de fibra contenida en la muestra de material.

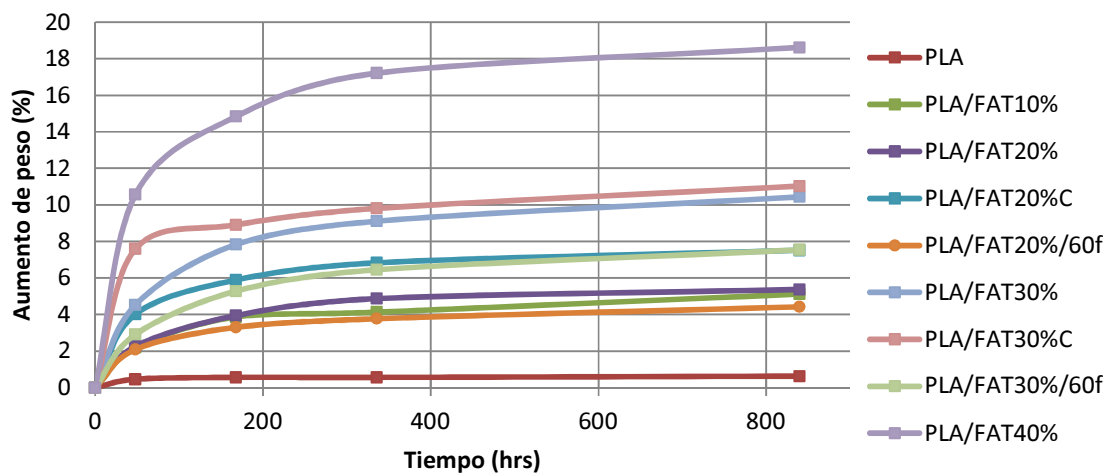
FAT%C – Material que se pasó por dos rodillos para lograr un acabado más liso.

FAT%60f – Material con fibra de menor tamaño obtenida con un tamizado con malla, 20, 40 y 60.

Al graficar el aumento de peso, contra el paso del tiempo, podemos observar en la **Figura 44** que al trazar una curva sobre los puntos no se trata de un crecimiento lineal, la curvatura indica una tendencia a la saturación del peso, en la cual se puede predecir un menor porcentaje de absorción si las muestras se mantuvieran más tiempo sumergidas.

No se observan alteraciones superficiales significativas entre los dos lapsos de tiempo, como agrietado o ruptura, en el caso de la muestra con un 40% de contenido de fibra, mostró un pandeo a lo largo de la pieza. Las muestras con un acabado más liso presentan un mayor porcentaje de humedad que sus contrapartes, lo cual puede deberse a que se utilizaron diferentes espesores para las pruebas, siendo estas las más delgadas. La capacidad natural de las fibras de absorber agua implica que se transfiere esta propiedad al material biocompuesto. Al utilizar un menor tamaño de fibra se logró disminuir el aumento de peso debido a la absorción, lo cual indica que puede ser una estrategia para contrarrestar esta desventaja en relación con aquellas aplicaciones del material donde afecte su uso, pero una ventaja durante su compostaje ya que es un factor que puede acelerar su biodegradación.

Figura 44. Absorción de agua con el paso del tiempo.



3.4.7. Resistencia a la Intemperie

Se realizó una prueba de resistencia a la luz ultravioleta, humedad y calor, por motivos de tiempo no se utilizó ningún método estandarizado, como el de la norma ASTM G53-96. Otro factor determinante fue por la baja resistencia del PLA a la exposición al sol que advierte el fabricante, por lo que no se consideró necesario recurrir a un método más complicado. De esta manera se realizó una prueba de exposición directa a los elementos, colocando 4 muestras del biocompuesto de 9 x 9.5 cm, con un contenido de fibra el 10, 20, 30 y 40%, y una muestra de PLA virgen extruido. Las muestras estuvieron 19 días expuestas, para lo cual se realizaron registros fotográficos cada 7 días, para analizar deformaciones y cambios de color de las muestras.

Deformación

Se puede observar para la muestra con un 10% de fibra de agave que la principal deformación ocurre después de 1 semana de exposición, después de 2 semanas no se aprecia un aumento sustancial de la deformación.

Figura 45. Deformación del biocompuesto con un contenido de fibra del 10%.

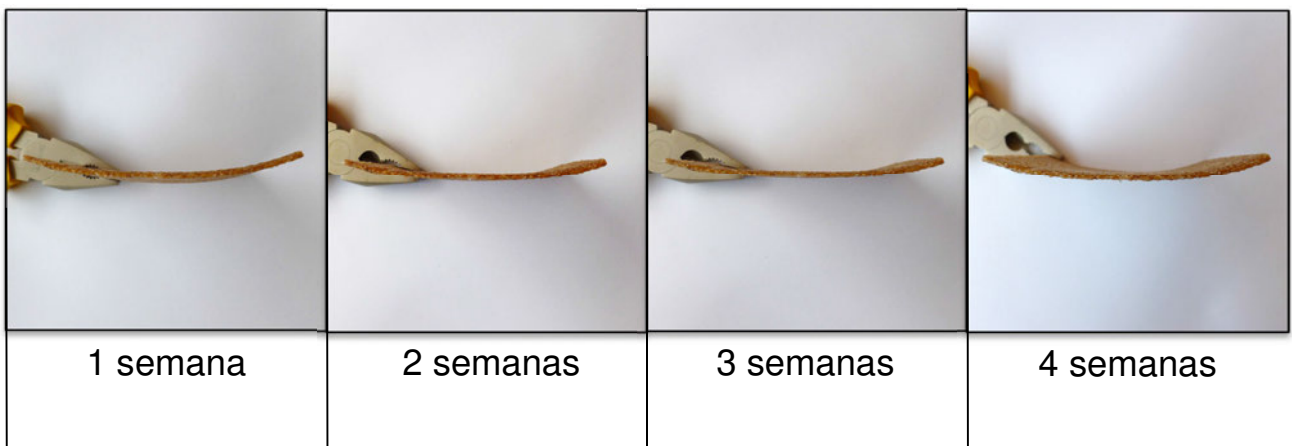


Figura 46. Deformación del biocompuesto con un contenido de fibra del 20%.

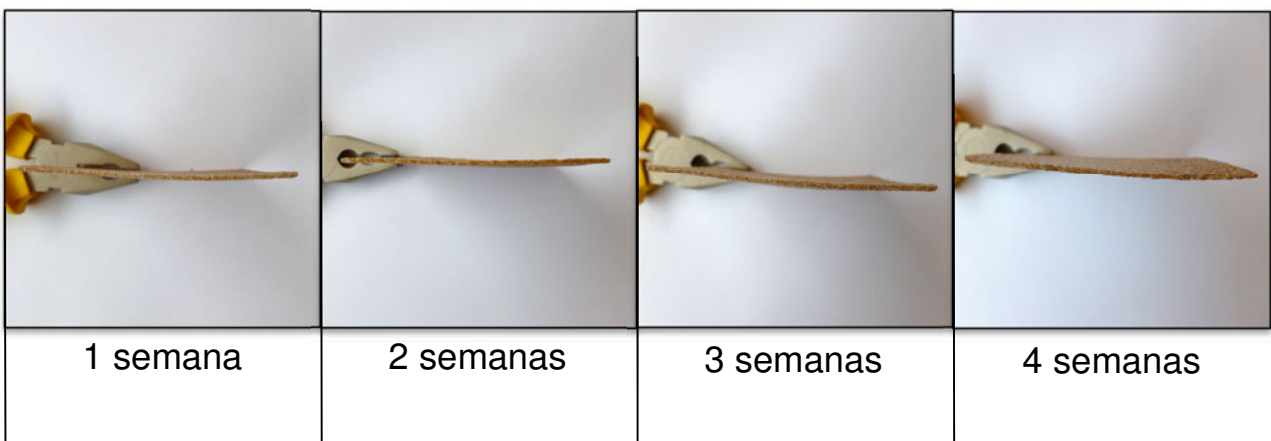
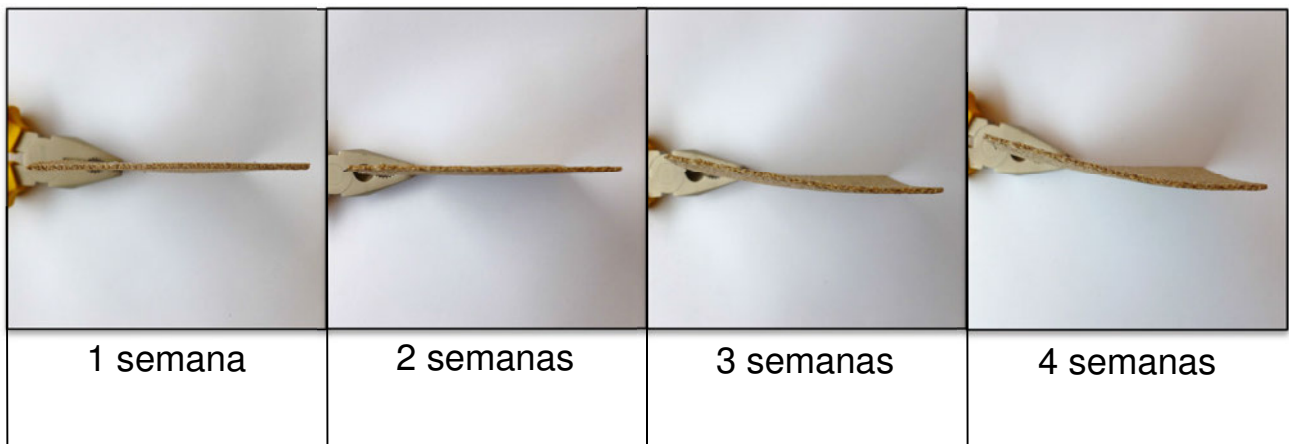


Figura 47. Deformación del biocompuesto con un contenido de fibra del 30%.



Figura 48. Deformación del biocompuesto con un contenido de fibra del 40%.

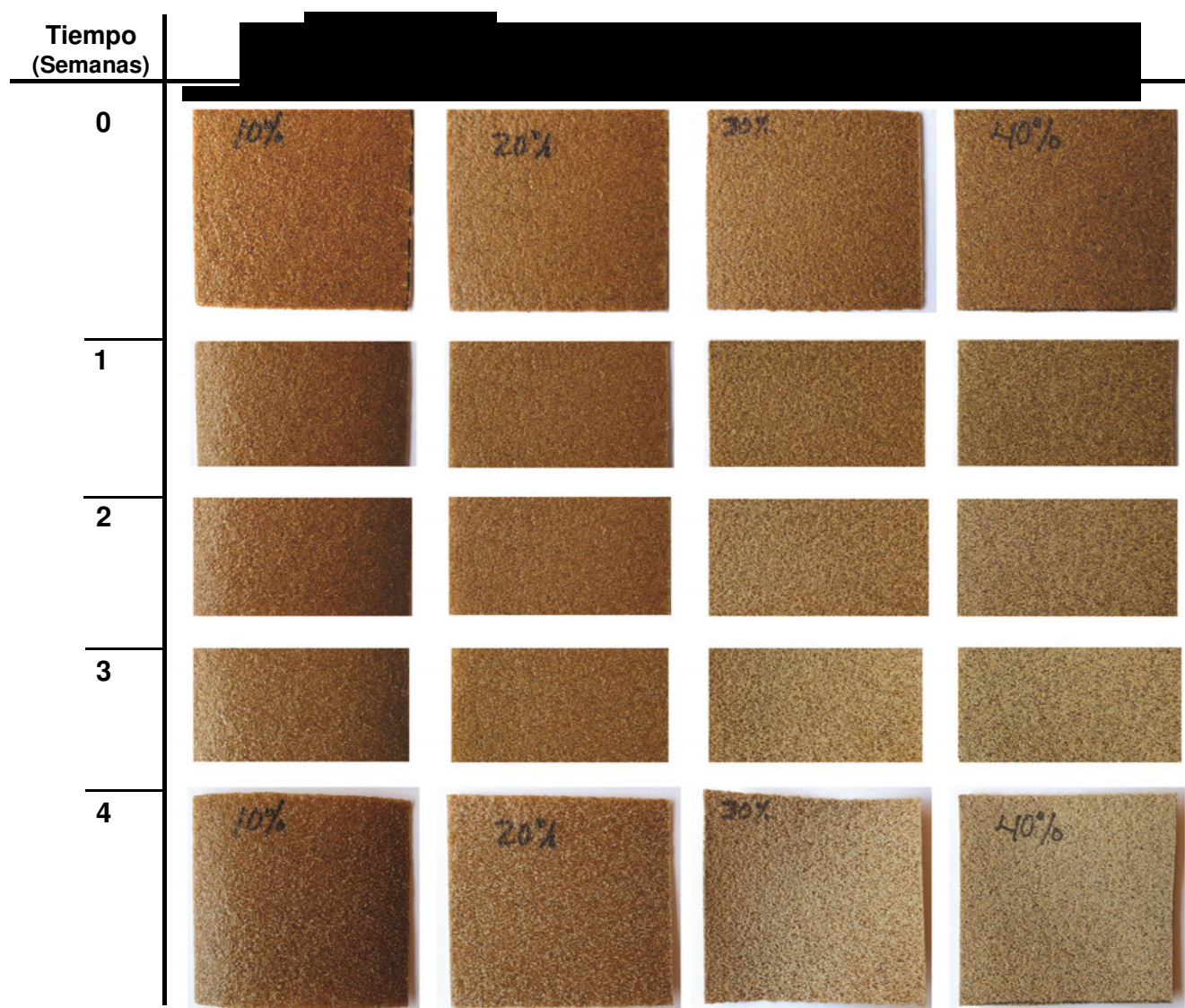


Podemos apreciar que la muestra que presentó mayor deformación es la que contiene 30% de fibra de bagazo de agave. El biocompuesto no presenta un comportamiento lineal en la afectación por la luz UV y la humedad, ya que al 10% de contenido de fibra se nota una deformación igual o mayor en comparación con la muestra de 20%. El biocompuesto PLA/FAT no presenta estabilidad al exponerlo a la intemperie lo cual indica que su aplicación se limita a espacios interiores.

Decoloración

Se puede apreciar un notorio cambio de color de las muestras con un contenido de fibra del 30% y 40%. El aumento en el contenido de fibra provoca que una mayor cantidad de fibras queden expuestas, las cuales se ven afectadas por la humedad y la luz UV en mayor medida que las muestras con un menor contenido de fibra. Las muestras con un contenido de fibra de 10% y 20% prácticamente no presentan decoloración.

Figura 49. Decoloración por exposición a la luz UV.



Tanto la decoloración como la deformación de las muestras de biocompuesto después de exponerlas a la intemperie durante 4 semanas, demuestran que la afectación es mayor con un contenido de fibra más alto, en general presentan poca resistencia a la luz UV, calor, y humedad. Esta información es determinante para definir los campos de aplicación del material y evitar su uso incorrecto.

3.4.8 Biodegradación

La biodegradación del PLA y de las fibras de agave depende de distintas variables, como temperatura, humedad, etc. de tal forma que no podemos trivializar la biodegradación como un proceso en el que los materiales se integran al medio ambiente una vez que han sido enterrados, esto se presenta como un argumento superficial. La disposición final del biocompuesto PLA/FAT debe ser analizada para lograr un cierre adecuado del ciclo de vida, ya que el manejo incorrecto de los residuos del biocompuesto puede resultar en el aumento del impacto ambiental del mismo.

Para obtener un marco de referencia, se enlistan diferentes definiciones usadas en relación con los plásticos biodegradables que se pueden encontrar en normas internacionales de calidad.

Tabla 36. Definiciones en relación con los plásticos biodegradables.

Organismo	Definición
DIN FNK 103.2	<p>Plásticos biodegradables <i>Un material plástico es llamado biodegradable si todos sus compuestos orgánicos se someten a un proceso completo de biodegradación. Las condiciones ambientales y la velocidad de biodegradación serán determinadas mediante pruebas de métodos estandarizados.</i></p> <p>Biodegradación <i>Biodegradación es un proceso causado por actividad biológica, que conduce al cambio de la estructura química a productos metabólicos de origen natural.</i></p>
ASTM Subcomité D20-96	<p>Plásticos biodegradables <i>Un plástico degradable es aquel en el cual la degradación resulta de la acción de microorganismos de origen natural como bacterias, hongos y algas.</i></p>
Japanese BioPlastics Association JBPA	<p>Plásticos biodegradables <i>Son los materiales poliméricos que son transformados en compuestos de menor peso molecular, donde al menos una etapa del proceso de degradación es metabólico en la presencia de microorganismos naturales.</i></p>
ISO 472	<p>Plásticos biodegradables <i>Son los plásticos diseñados para someterse a un cambio significativo en su estructura química bajo condiciones ambientales específicas, lo cual resulta en la pérdida de algunas propiedades, que pueden variar al medirlas con pruebas de métodos estandarizados, apropiado para el plástico y la aplicación en un periodo de tiempo que determina su clasificación. El cambio en la estructura química es producto de la acción de microorganismos de origen natural.</i></p>
CEN European Committee for Standardization	<p>Plásticos biodegradables <i>Son materiales biodegradables en los cuales la degradación resulta de la acción de organismos y finalmente el material es transformado en agua, dióxido de carbono y/o, metano y nueva biomasa.</i></p> <p>Biodegradación <i>La biodegradación es la degradación causada por actividad biológica, especialmente acción enzimática, produciendo un cambio significativo en la estructura química de un material.</i></p> <p>Biodegradabilidad inherente <i>El potencial de biodegradarse de un material, establecido en condiciones de laboratorio.</i></p> <p>Biodegradabilidad última <i>Es el rompimiento por microorganismos de un compuesto químico orgánico, en la presencia de oxígeno, para biodegradar dióxido de carbono, agua y sales minerales de cualquier otros elemento presente (mineralización) y biomasa nueva, o en la ausencia de oxígeno a dióxido de carbono, metano, sales minerales y nueva biomasa.</i></p> <p>Compostabilidad <i>La compostabilidad es la propiedad de biodegradación de un empaque en un proceso de compostaje. Para reclamar la compostabilidad, debe de haberse demostrado que un empaque puede ser biodegradado en un sistema de compostaje como se muestra en los métodos estandarizados. El producto final debe cumplir con los criterios de calidad del compost relevante.</i></p>

Fuente: Biodegradability of Polymers: Regulations and Methods for Testing, (Müller, 2005, pág. 369).

La degradación del biocompuesto PLA/FAT se puede realizar por diferentes métodos. La empresa Nature Works que fabrica el biopolímero Ingeo 2003D utilizado en la experimentación, recomienda que la biodegradación del PLA se lleve a cabo en un ambiente de composta, en la cual se presentan características determinadas para degradar adecuadamente el material. Esto sólo habla de la matriz del biocompuesto, al añadir un contenido de fibra se modifican las características de biodegradación. Es posible encontrar estudios acerca de la degradación de compuestos similares que nos pueden dar una referencia del tiempo que tarda en biodegradarse un material biocompuesto. Las investigaciones realizadas en Japón por Shinji Ochi (2008), y por Asep Hidayat y Sanro Tachibana, (2012), estudian la degradación de un biocompuesto de PLA y cáñamo de la india (kenaf) por medio de actividad enzimática. En la investigación de Ochi se degradó el material en una máquina de procesamiento de basura orgánica, lo cual demostró una pérdida de peso de 38% después de un mes. En el trabajo de Hidayat y Tachibana utilizaron el hongo *Pleurotus ostreatus* como degradador, el análisis comprueba que el compuesto tuvo una pérdida de peso del 30% después de 3 meses y del 48% después de 6 meses. Los resultados obtenidos por Yussuf Ket. et al. (2010) reportan una pérdida de peso únicamente del 1.2% después de 3 meses, al enterrar las muestras en el suelo para simular un ambiente natural, lo cual nos indica que la actividad microbiana y enzimática es crucial para acelerar la degradación de este tipo de biocompuestos. Estos estudios se toman como referencia ya que las fibras de kenaf y de agave tienen una composición lignocelulósica (aunque con diferentes porcentajes) y ambas son consideradas fibras duras.

En relación con el uso de fibra de agave, Chin-San Wu, (2011), hizo una investigación de la biodegradabilidad de un material compuesto con PLA y fibras de sisal procedentes de Taiwán. Las muestras con un contenido de 20 y 40% de fibra, tuvieron una pérdida de $\pm 40\%$ y casi $\pm 70\%$ de peso después de 14 semanas de entierro, en el cual se mantuvo un 30% de humedad en la tierra, en comparación con la muestra de PLA, la cual presenta únicamente el $\pm 10\%$ de pérdida de peso.

Existen distintos métodos estandarizados para determinar la biodegradabilidad de un material, en la **Tabla 37** se enlistan algunos:

Tabla 37. Métodos estandarizados para determinar la degradación de plásticos.

Organismo	Método
ISO	ISO 14855 ISO 17556
ASTM Subcomité D20-96	ASTM D6400 ASTM D5338 ASTM D5929 ASTM D5988
OECD Serie 301	OECD 301

Fuente: Biodegradability of Polymers: Regulations and Methods for Testing, (Müller, 2005, pág. 370).

Prueba de degradación en suelo

Por motivos de tiempo no fue posible realizar un estudio de biodegradación de acuerdo a un método estandarizado de prueba, por lo que se eligió realizar una prueba rudimentaria de degradación en suelo. Para obtener un análisis cualitativo de la degradación del biocompuesto en el suelo, se realizó una prueba utilizando tierra preparada en dos recipientes plásticos, en los cuales se enterraron 6 muestras del biocompuesto PLA/FAT y fueron cubiertos con una tapa transparente, con la posibilidad de entrada y salida de aire. Los recipientes se regaban periódicamente para mantener un grado de humedad aproximado. Después de dos meses de entierro, la muestra que más se vio afectada fue la del contenido de fibra al 40% (PLA/FAT40), lo cual puede indicar que a medida que se aumenta el contenido de fibra la degradación del material se acelera. Las muestras analizadas tenían un peso que oscilaba de los 2.6 a los 4.1g, al sólo contar con una báscula digital con una precisión de 0.1g, no se pudo analizar si hubo alguna oscilación de centésimas de gramo. No se registraron pérdidas significativas de peso, en relación a la apariencia del material, se aprecia decoloración y en algunas muestras manchas oscuras que pueden representar la absorción de humedad. En el caso de la muestra PLA/FAT40 en el momento de analizarla se partió en dos pedazos, lo cual demostró la fragilidad de la misma, a diferencia con la resistencia y flexibilidad que presentaron las otras muestras.

El experimento realizado no entra en la denominación de una prueba de compostaje, sino como una prueba de biodegradación en suelo sin intervención externa, lo cual no determina las características de degradación que presentará el biocompuesto PLA/FAT en otro tipo de ambientes. Este tipo de pruebas nos ayuda a conocer las propiedades del material de manera que pudimos comprobar que un poco de tierra y humedad no convierten en polvo a los biopolímeros biodegradables, se puede apreciar de manera cualitativa una relación en la pérdida de propiedades mecánicas con el aumento en el contenido de fibra.

Figura 50. Preparación de la prueba de degradación 3 de Julio de 2012.



Figura 51. Registro de la prueba el 13 de Septiembre de 2012.



Figura 52. Muestras de Biocompuesto PLA/FAT después de pruebas de degradación.

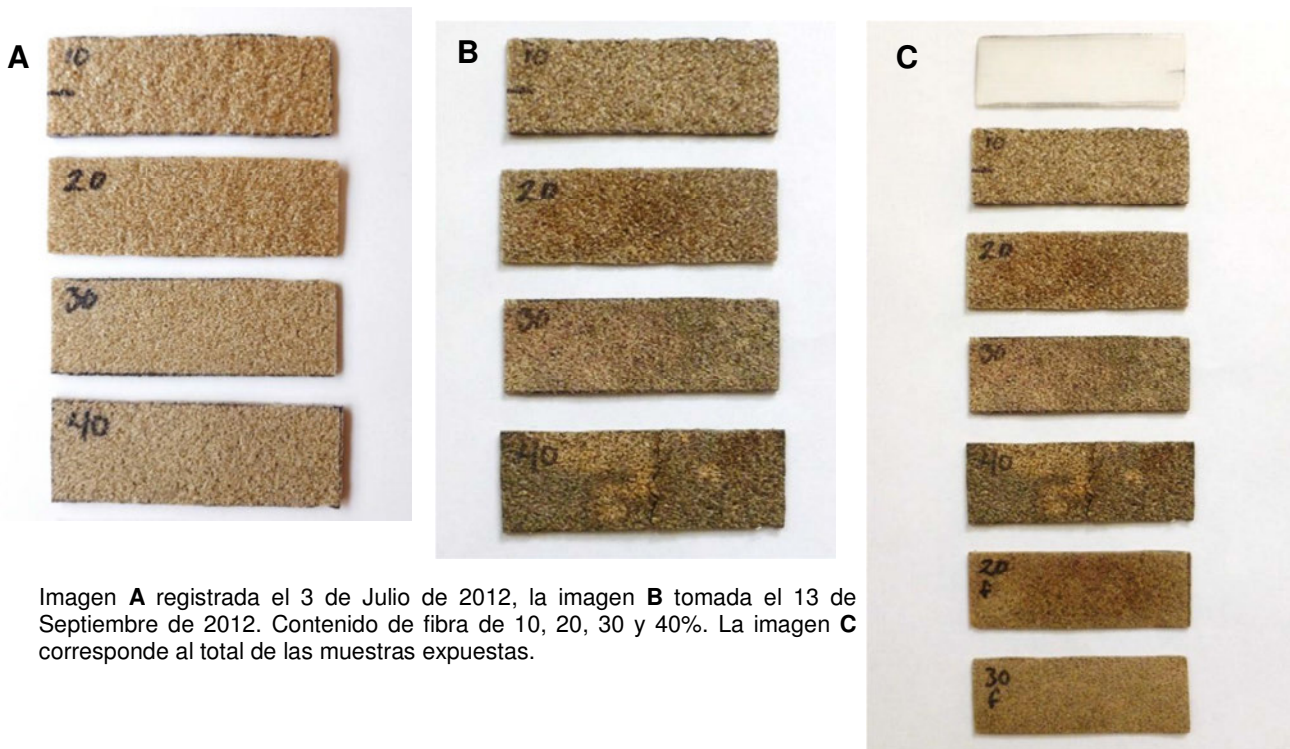


Imagen **A** registrada el 3 de Julio de 2012, la imagen **B** tomada el 13 de Septiembre de 2012. Contenido de fibra de 10, 20, 30 y 40%. La imagen **C** corresponde al total de las muestras expuestas.

Es posible apreciar en la **Figura 52** las diferencias de color al comparar las muestras en su estado original y después de haber sido enterradas, lo cual indica que el material se está viendo afectado por el ambiente, pero no se ha visto afectado radicalmente. Es notorio que la muestra más afectada fue la que tiene un contenido del 40% de fibra, pudiendo ser entonces un factor determinante para acelerar el proceso de degradación. Este comportamiento se debe en gran parte a la alta absorción de agua que tiene la fibra, ya que al representar un mayor contenido permite que la muestra se reblandezca más rápido y pierda propiedades, lo cual es evidente en la muestra de PLA, la cual no presentó cambios de color ni una pérdida de masa.

El contenido de fibra es una variable que puede ayudar a acelerar la biodegradación al fomentar el crecimiento de bacterias, en la investigación de Jandas, Mohanty, et al. (2011, pág. 1698), se hicieron pruebas de degradación a biocompuestos de PLA reforzados con fibras de plátano. Para realizar la degradación de películas del biocompuesto, se utilizó bacteria *Burkholderia cepacia*³⁶. Los resultados del análisis de microscopía SEM muestran que el PLA virgen tiene un menor ritmo de degradación en comparación con los biocompuestos. Una de sus conclusiones es que el uso de fibra mejora la atracción de las bacterias hacia el PLA, debido en gran parte por la absorción y retención de agua de las fibras y el PLA.

Figura 53. Muestra con un contenido del 40% de fibra después de dos meses de entierro.

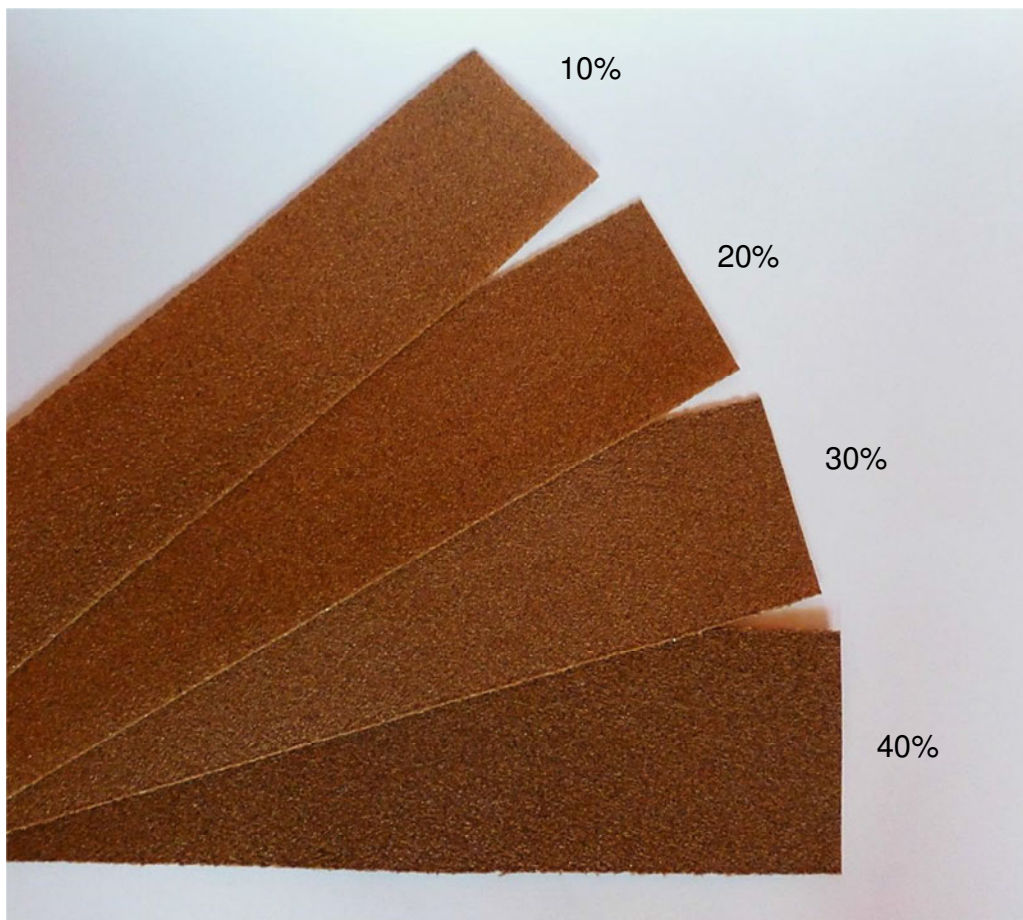


³⁶ La bacteria *Burkholderia cepacia* crece por la descomposición de distintos alimentos. En este caso se obtuvo a partir de dextrosa de papa.

3.5 Conclusiones de la experimentación

En el transcurso de la experimentación se elaboraron con éxito materiales biocompuestos a partir de una matriz de PLA y como agente de refuerzo fibras de bagazo de *Agave tequilana* W. (FAT) Se comprobó la posibilidad de procesar el material biocompuesto por distintos métodos mediante maquinaria existente para procesar termoplásticos petroquímicos, lo cual es muy importante ya que no se requiere del desarrollo de nueva tecnología, sin implicar que no se requieran modificaciones en el futuro para optimizar el procesamiento.

Figura 54. Láminas extruidas con diferente contenido de fibra.



Se pudo apreciar estabilidad en el material extruido así como homogeneidad en la mezcla. En cuanto al análisis de las propiedades mecánicas, se observó que la resistencia a la tensión del material disminuye al aumentar el contenido de fibra. El aumento del módulo elástico describe que el material se vuelve más rígido y quebradizo al aumentar el contenido de fibra, lo cual deberá ser tomado en cuenta en el momento de su aplicación. En relación a la resistencia a la flexión se aprecia el mismo comportamiento, ya que al aumentar el contenido de fibra disminuye la resistencia, lo cual describe un material menos flexible, y respalda los resultados obtenidos en las pruebas de resistencia a tensión.

La resistencia al impacto del biocompuesto PLA/FAT presenta un comportamiento distinto, ya que el aumento de contenido de fibra en la matriz aumenta la resistencia al impacto del material, siendo 52.4% mayor en comparación con el PLA virgen, en este sentido la mezcla de los componentes del biocompuesto permite obtener una considerable mejora en esta propiedad, lo cual puede aprovecharse para la aplicación del material en campos donde el PLA sólo no podría utilizarse.

Las temperaturas de transición vítrea y de fusión de las formulaciones del material nos permiten anticipar el comportamiento del material en ambientes donde la temperatura se eleve a más de 65°C con una posible alteración significativa de las propiedades mecánicas a partir de los 110°C, al empezar la cristalización para cambiar de fase a partir los 150°C.

Mediante el moldeo por compresión se obtuvieron probetas para realizar las pruebas de resistencia al impacto. Se utilizaron tiras recortadas a partir de las láminas extruidas, para después acomodarlas en un molde y darles la forma deseada mediante una prensa. Este proceso comprueba la capacidad de reciclaje del material debido al carácter termoplástico de la matriz. Utilizando este método de procesamiento también se realizaron otras pruebas para moldear la lámina extruida para adoptar una forma específica. Para esto se utilizó un molde de aluminio de dos piezas, por medio del cual se obtuvieron muestras de platos de 12cm de diámetro (**Figura 56**).

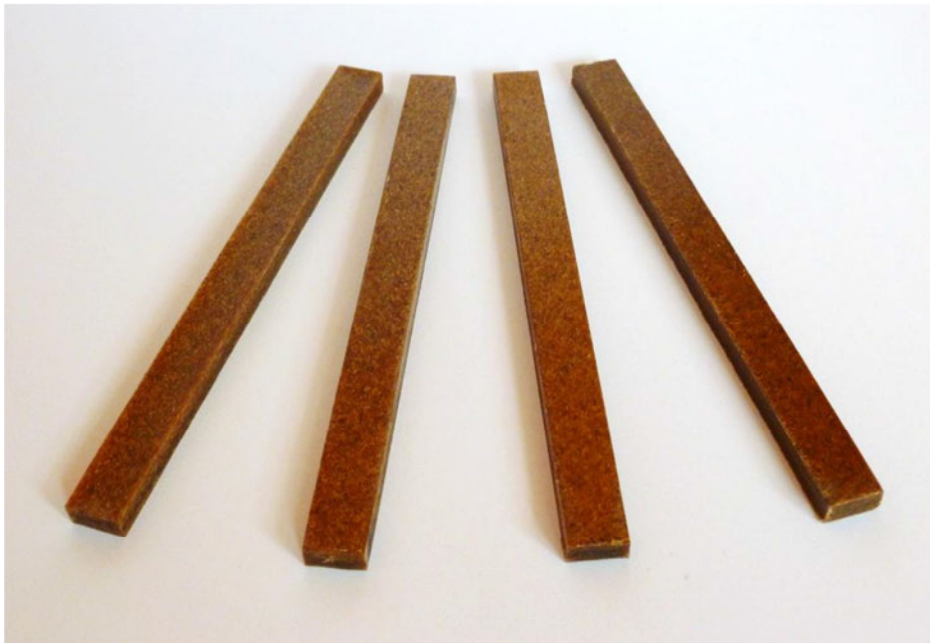
Figura 55. Molde de aluminio para pruebas de moldeo por compresión.



Figura 56. Platos obtenidos mediante moldeo por compresión.



Figura 57. Muestras obtenidas por moldeo por compresión.



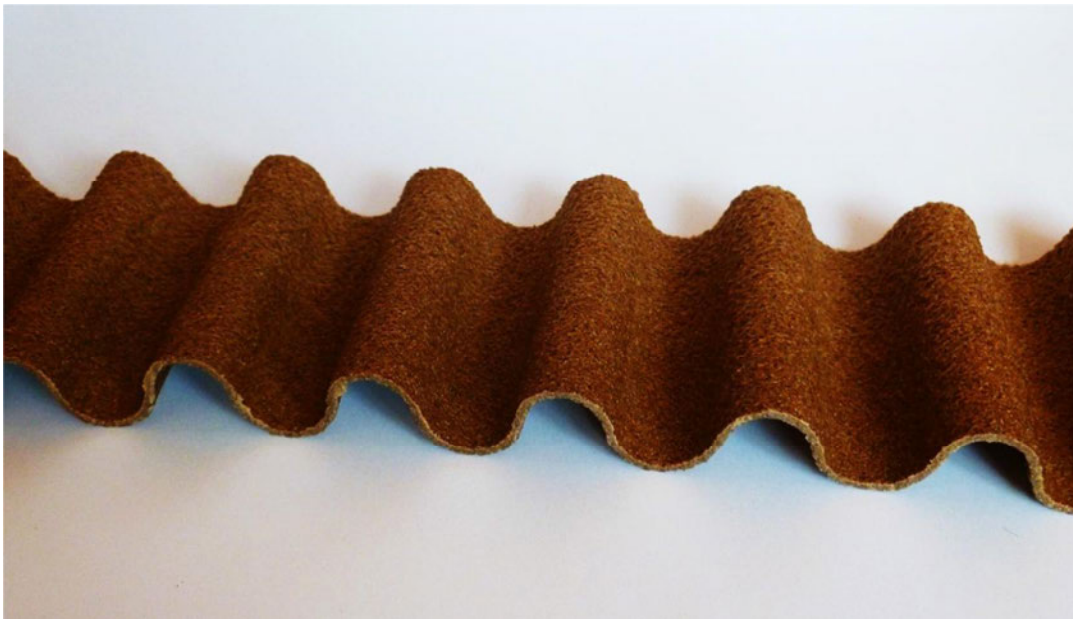
De izquierda a derecha el contenido de fibra de bagazo de las muestras es: 10, 20, 30 y 40%.

En la **Figura 58** se aprecian las diferencias de las formulaciones del material observadas a contraluz, a menor contenido de fibra de agave se obtiene un material más translúcido. Con el objetivo de probar la moldeabilidad del material se realizaron pruebas por medio de una máquina ondulatora, la cual confirma la posibilidad de transformación del material dentro de una cadena de producción continua (**Figura 59**).

Figura 58. Diferentes formulaciones del material.



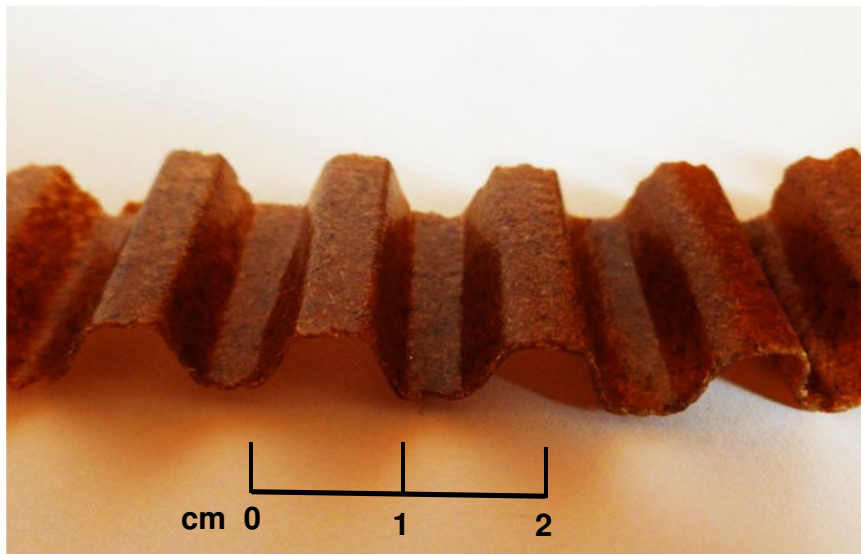
Figura 59. Lámina ondulada con un contenido de fibra de 30%.



Otra prueba realizada fue mediante el troquelado continuo para producir una lámina acanalada, utilizando una tira de lámina de 2.5cm de ancho y aproximadamente 30cm de largo con un espesor menor a 1mm (**Figura 60**). Estas pruebas se realizaron en un máquina originalmente diseñada para formar láminas de metal, la cual consiste de dos engranes encontrados que giran por medio de un motor eléctrico para ejercer presión en la lámina y dar la forma deseada. La probeta se calentó por medio de una pistola de calor hasta reblandecerla. El objetivo de la prueba fue comprobar la posibilidad de adquirir formas con ángulos más cerrados sin presentar agrietamientos o daño visible. La procesabilidad del biocompuesto demuestra ser bastante versátil, ya los métodos que se experimentaron en el transcurso de esta investigación fueron exitosos lo cual permitió

obtener distintos acabados, variaciones de color, así como diversas propiedades mecánicas, lo cual implica tener alternativas de producción y aplicación para material.

Figura 60. Lámina troquelada.



Mediante la experimentación y el análisis de las propiedades del biocompuesto PLA/FAT, se pueden determinar sus limitantes para acotar el rango de aplicaciones del material, sin olvidar que cada caso puede necesitar de pruebas específicas, así como modificaciones para cumplir con los requerimientos de diseño.

La prueba de absorción de agua expone que el biocompuesto PLA/FAT no es apto para usarse en exteriores o ambientes donde haya exposición directa y prolongada a la humedad, ya que presenta una alta absorción lo cual puede interferir con las propiedades mecánicas del biocompuesto y su estabilidad dimensional. Al aumentar el contenido de fibra el porcentaje de absorción aumenta lo cual se debe a que aumenta el contenido de celulosa en el biocompuesto. Por otra parte la disminución del tamaño de fibra dentro de la matriz ayuda a disminuir el porcentaje de absorción, la exploración de este comportamiento requiere de pruebas extensivas en el caso de querer usarlo para una aplicación donde se presenten estas condiciones, con la posibilidad de utilizar algún tratamiento o acabado con características que no interfieran con el desempeño ambiental del biocompuesto PLA/FAT. Por otra parte la alta absorción de humedad que la fibra de agave transmite al material también se presenta como una ventaja en el momento de biodegradar el material, ya que fomenta la degradación por la acción de microorganismos, lo cual ayuda a acelerar la etapa de disposición final y se podría aprovechar en aplicaciones con un tiempo de vida corto, como los productos desechables.


La experimentación nos permitió hacer una caracterización del material biocompuesto y nos otorga un mejor entendimiento del comportamiento que tendrá bajo ciertos esfuerzos y condiciones, lo cual puede ayudar a tomar decisiones en el proceso de diseño para implementarlo en campos de aplicación que requieren de estas características. Los resultados obtenidos en la elaboración y análisis del biocompuesto PLA/FAT no deben interpretarse como determinantes, ya que el método para elaborar un material puede variar por el hecho de cambiar de máquina para procesarlo, escalar la producción, modificar la mezcla de los materiales, cambiar el tipo de biopolímero, etc. Todas las variables involucradas pueden producir cambios en los resultados obtenidos y alteraciones en las propiedades del biocompuesto. Esto ofrece la oportunidad de optimizar propiedades específicas del material mediante la experimentación, lo cual puede permitir desarrollar el material a partir del enfoque de un campo de aplicación específico, dando como resultado distintos tipos del biocompuesto PLA/FAT.

Figura 61. Hoja de Especificaciones del biocompuesto PLA/FAT30.

Hoja de Especificaciones Técnicas

BIOCOMPUESTO PLA/FAT 30

70% PLA - Políácido Láctico
30% FAT - Fibra de Bagazo de *Agave tequilana*



El biocompuesto PLA/FAT es un material conformado 100% por recursos renovables, a partir de una matriz de políácido láctico y como agente de refuerzo fibras de bagazo de *Agave tequilana*. Este material se puede procesar en equipos convencionales para extrusión de polímeros termoplásticos, se recomienda el uso de doble husillo para mejorar la integración de la mezcla.

Detalles de Proceso

El biopolímero PLA utilizado en el material no es compatible con ciertas resinas y se deben seguir las siguientes recomendaciones de purgado:






- Limpiar la extrusora y precalentar utilizando polietileno o polipropileno para uso general como purga.
- Una vez que se ha realizado la purga reduzca los niveles de temperatura para alcanzar lo que se indica.
- Al terminar de procesar purge la máquina con poliestireno o polipropileno de alta viscosidad.

Secado

Se recomienda el secado del material por los menos 5 horas antes del procesamiento a una temperatura de 70-80 °C. Mantener el material en un recipiente sellado para evitar la absorción de humedad y tiempo adicional de secado.

Precauciones Generales

Este material debe permanecer en ambientes interiores, sin estar expuesto al agua y a la luz solar durante tiempos prolongados. No se debe exponer a la flama ya que es inflamable.

Propiedades

Propiedades Físicas	PLA/FAT30	Método ASTM
Densidad (g/cm ³)	1.29	/
Propiedades Mecánicas		
Resistencia a la tensión (MPa)	30.8	D638
Resistencia a la flexión (MPa)	11.2	D790
Resistencia al impacto (J/m)	46.9	D256
Propiedades Térmicas		
Temperatura de Transición Vitrea T _g (°C)	65.2	/
Temperatura de Cristalización T _c (°C)	123.9	/
Temperatura de Fusión T _m (°C)	153	/

Temperaturas de Procesamiento

Zona	Temperatura (°C)
Alimentación	165
Sección de compresión	175
Sección de dosificación	185
Dado	175

Disposición Final

Existen diferentes opciones de disposición final para el biocompuesto PLA/FAT:

- Reciclaje: Todos los residuos preconsumo y postconsumo pueden reprocesarse.
- Compostaje: Se puede biodegradar en un ambiente de composta bajo la acción de microorganismos. El tiempo de degradación depende de variables como tamaño de los residuos, volumen, condiciones de la composta, etc.
- Recuperación de energía: Se puede considerar la incineración para la combustión del material como biomasa para extraer energía calorífica.
- El biocompuesto PLA/FAT no debe desecharse bajo ninguna circunstancia en ningún cuerpo de agua.

3.6 Experimentación a nivel industrial

A partir del trabajo realizado en la experimentación se plantea la importancia de realizar pruebas a nivel industrial para estudiar los cambios en los parámetros de extrusión, características cualitativas del material, así como demostrar la viabilidad de producción del biocompuesto a una mayor escala. El procesamiento a nivel industrial del material biocompuesto PLA/FAT surge como una oportunidad indispensable para continuar las pruebas para el entendimiento de las propiedades del material y así obtener más información para su posible aplicación.

Como parte del proyecto Estrategias de Ecodiseño, Desarrollo de Productos Ambientalmente Responsables, se obtuvieron recursos gracias al proyecto institucional UNAM PAEP (Proyectos de Apoyo a Estudios de Posgrado) 2011 de los cuales parte se utilizó para llevar a cabo la experimentación a nivel industrial mediante la contratación de un servicio de extrusión³⁷, así como otra parte para adquirir la materia prima correspondiente. Mediante estas prácticas se pretendió alcanzar los siguientes objetivos:

- Elaboración de pruebas de procesamiento del material biocompuesto a nivel industrial.
- Extrusión del biocompuesto PLA/FAT con distintos datos.
- Laminado del material.
- Realizar de pruebas de pigmentación.
- Uso de aditivos para mejorar el procesamiento del material.

Se procedió a la elaboración de pruebas en las instalaciones de la empresa Plastilam, para lo cual se asignó de manera inicial una máquina extrusora doble husillo para comenzar a analizar el comportamiento de la mezcla de los componentes.

Materiales

- **Matriz:** Biopolímero Ingeo 2003D grado extrusión, de la empresa Nature Works™, lote AA1328B131.
- **Agente de refuerzo:** Fibra de bagazo de agave tequilero procedente de empresas tequileras de los Altos de Jalisco.
- Aditivo de procesamiento Struktol TPW 113.

Procesamiento

El procesamiento del material se puede esquematizar como se muestra en la **Figura 62**. Este proceso se utilizó para la producción de perfiles y lámina.

Extrusión

- Por medio de un dado para obtener distintos perfiles.
- Por medio de un dado plano y calandrado para obtener una lámina.

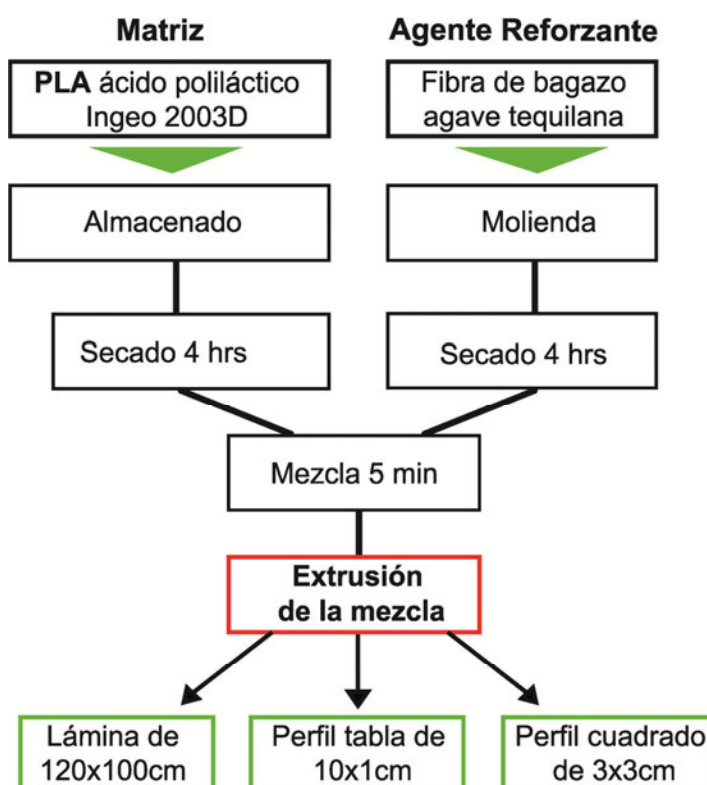
En la **Tabla 38** se muestran las mezclas que fueron utilizadas durante el procesamiento, se eligieron estos contenidos de fibra ya que después de la experimentación en el CICY, los mejores resultados ocurrieron a partir de un contenido de fibra del 30 y 40%.

³⁷ En la empresa Plastilam S.A de C.V. se dedican al reciclaje de plásticos para la producción de perfiles y láminas. La experiencia de la misma en el procesamiento de termoplásticos con cargas orgánicas, como aserrín de madera representa una ventaja para los objetivos de la investigación.

Tabla 38. Formulaciones utilizadas en el procesamiento.

Muestra	PLA (%)	Fibra de Agave (%)	Tamaño de fibra (mm)
PLA	100		
PLA/FAT30	70	30	≤2
PLA/FAT40	60	40	≤2
PLA/FAT50	50	50	≤2

Figura 62. Árbol de procesos del procesamiento industrial.



Parámetros de extrusión

De manera inicial los parámetros de extrusión se determinaron a partir de las temperaturas utilizadas en la primera experimentación. De igual manera se dio inicio procesando el PLA virgen para analizar la respuesta de la maquinaria utilizada. Desde el comienzo los parámetros utilizados en la primera experimentación tuvieron que ser modificados, ya que tanto el polímero como el biocompuesto no se estabilizaron³⁸ con estos parámetros.

³⁸ La estabilización de un material extruido se refiere a poder extruir la mezcla de materiales o un material en el cual la consistencia y flujo determinan si el material puede adoptar y mantener la forma que le otorga el dado de extrusión.

El funcionamiento de la máquina de extrusión depende de un husillo (que puede estar hecho de diversos tipos de metal) el cual gira dentro de un cañón metálico, para empujar el material hacia el dado. La fricción del husillo contra el cañón produce que la temperatura de las zonas de extrusión se eleve conforme el proceso se estabiliza, lo cual no corresponde con la temperatura programada en el termostato, elevándose hasta 20 °C. No todas las zonas presentan el mismo incremento de temperatura. El recorrido de la mezcla desde la tolva hasta el dado representa una exposición de mayor o menor tiempo a estas altas temperaturas, lo cual puede producir la degradación del biocompuesto principalmente de las fibras de agave que tienen una menor resistencia al calor.

Podemos hacer una comparación entre los parámetros de extrusión que se utilizaron en la experimentación en el CICY y los parámetros utilizados a nivel industrial para la producción de láminas. Aun cuando se asignaron temperaturas bajas para las zonas de extrusión en la industria, la temperatura real alcanzó hasta 180° C.

Tabla 39. Comparación de parámetros de extrusión.

Zona	Temperatura (° C)	
	Laboratorio	Industria
1	165	130
2	175	120
3	185	130
4	175	130
5	/	140
6	/	140
7	/	160

Materiales Obtenidos

Se obtuvieron distintos perfiles de extrusión para lo cual hubo que lograr estabilizar la mezcla en los equipos disponibles, con lo cual en los primeros resultados se aprecia la mala integración de la mezcla y burbujas en la superficie, etc. En la **Figura 64** se puede apreciar un fragmento las primeras muestras obtenidas al tratar de extruir un perfil en ángulo.

Figura 63. Extrusión del biocompuesto PLA/FAT.



Figura 64. Muestras de perfil extruido composición 80/20 PLA/FAT.



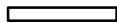
Eventualmente se consiguió extruir el perfil de manera más estable y demostrando una mezcla homogénea lo cual fue un indicador para continuar con la extrusión de otros perfiles. Al configurar de manera óptima las etapas para que el procesamiento del biocompuesto fuera exitoso, se lograron extruir distintos perfiles y láminas que comprueban distintas opciones para la producción del material.

Figura 65. Perfiles obtenidos durante la experimentación.

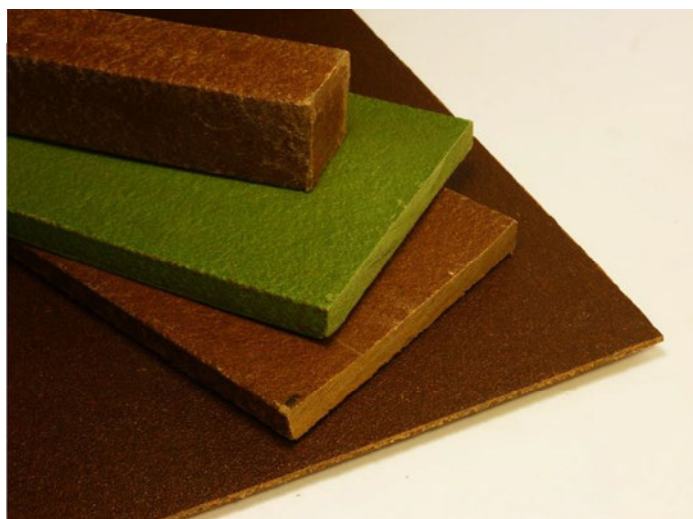
Lámina 120x100cm



Perfil Tabla 10x1cm



Perfil Cuadrado 3x3cm



Acabado

Los materiales obtenidos presentan distintos acabados que dependen del método de procesamiento. El color que presentan las muestras es más oscuro en relación a los tonos obtenidos en las muestras de laboratorio, lo cual representa una mayor degradación de la fibra durante el proceso. En este sentido se presentó como una variable difícil de corregir ya que el recorrido de la mezcla por el cañón de la extrusora así como la fricción de husillo con el cañón eleva inevitablemente la temperatura de las zonas de extrusión. Un factor determinante en esta cuestión es la tecnología de procesamiento, ya que hay máquinas que cuentan con enfriamiento en cada zona, así como sistemas de monitoreo y control más avanzados. Las láminas obtenidas

presentan un color café oscuro que no muestra señales de carbonización, aun cuando se note una mayor degradación de la fibra. Se puede apreciar en la **Figura 66** que existe una variación considerable de color al comparar dos muestras del biocompuesto con una concentración de fibra del 30%. El color más oscuro se obtuvo en la laminación, mientras que en la producción del perfil tabla y cuadrado se puede apreciar un color café un poco más claro (**Figura 65**).

Por medio de un colorante a base de Polietileno (PE) se pudo obtener un color distinto al café que ha demostrado el biocompuesto, al agregar color amarillo a la mezcla para obtener verde. La coloración del material siempre será un producto de la mezcla de color café base (que depende de la formulación del material) con el color añadido, la gama de tonos posibles está limitada por esta combinación. Es necesario notar que por motivos de disponibilidad se utilizó un colorante a base de PE pero aun cuando se añada sólo un 2% del peso total de la mezcla, esto representa una sustancia ajena a la naturaleza del biocompuesto. Para determinar si esta acción implica un factor de contaminación para la mezcla de materiales, habría que determinar la forma en que este colorante se degrada durante el compostaje del material. Cabe destacar que existe la posibilidad de utilizar colorantes para polímeros termoplásticos que no sean a base de plásticos petroquímicos.

Figura 66. Comparación de color entre láminas del biocompuesto PLA/FAT.



En la **Figura 67** se pueden observar distintos acabados debido a las variaciones en el flujo del material al pasar por el dado de extrusión, lo cual crea excesos de material que son compactados por los rodillos de laminación lo cual produce que se distribuya y acumule el material en ciertas áreas. Un factor importante es que los dados de extrusión no están diseñados para las características del flujo de la mezcla de PLA con la fibra de bagazo de agave. En la mayoría de los casos las láminas producidas quedaban por un lado con un acabado casi homogéneo en color y por el otro con distintas marcas y formas, pero en ambos lados con una textura lisa mate. Por medio de un rodillo con una superficie texturizada se obtuvieron algunas láminas con un lado completamente liso y otro con una ligera textura.

Figura 67. Marcas de acabado debido a la fricción del dado y el flujo de material.



En el perfil tabla también se presentaron marcas en algunas secciones de las piezas producidas. Es interesante que estas “vetas” se presenten como marcas únicas que de cierta forma otorgan un carácter distinto a cada pieza, lo cual podría considerarse una cualidad estética en lugar de un error de producción.

Figura 68. Sección de láminas de biocompuesto PLA/FAT con vetas de extrusión.



Medidas aproximadas de las secciones: 90 x 50cm.

Aun cuando la tecnología que se utilizó en estas prácticas no sea de última generación, se destaca que este equipo se sigue utilizando para procesar materiales reciclados y vírgenes de alta calidad. El comportamiento de la mezcla al procesarla con la tecnología disponible nos permite aprender distintos aspectos acerca del material y la vez exponer más cuestionamientos acerca del mismo.

¿Tiene las mismas propiedades mecánicas y térmicas que las muestras obtenidas a nivel laboratorio? ¿Cómo se puede controlar la producción del acabado heterogéneo obtenido en la laminación? ¿Qué configuración tecnológica se requiere para evitar la degradación de la mezcla por el incremento de la temperatura durante el proceso de extrusión?

3.6.1 Costo de la producción del biocompuesto PLA/FAT

El costo para producir el material biocompuesto PLA/FAT determina en gran medida la viabilidad para que se produzca a nivel industrial y sea aceptado por los productores y consumidores. El siguiente cálculo se realizó en relación a los costos de la materia prima, a un estimado del costo por el servicio de extrusión del material, así como otros procesos involucrados³⁹. El costo de producción corresponde a 1Kg de material. El costo del PLA se presenta como un factor variable, ya que depende del tipo de cambio con el dólar.

En la **Tabla 40** se muestra una comparación de precios de distintos bioplásticos y distintos termoplásticos comunes. Se pueden apreciar rangos amplios en el precio de los materiales ya que esto depende de la empresa, capacidad de producción y el tipo de material. El polietileno verde o Bio-Pe, tiene el menor precio lo cual está relacionado con la alta producción de este biopolímero que en el 2011 ocupó un 17.2% de la producción mundial de bioplásticos (European Bioplastics, 2012). En la tabla se incluye información acerca del precio de algunos termoplásticos petroquímicos con el fin de destacar la diferencia con el precio de los bioplásticos que es significativamente más alto en algunos casos.

Tabla 40. Precio de distintos bioplásticos y termoplásticos petroquímicos comunes.

Fuentes	Fabricante	Capacidad Miles de ton/año	Precio	
			USD\$/ Kg	MN\$/ Kg
Almidón	Cereplast	36	2.35 – 6.70	30.47 – 86.89
	Novamon	80		
Polihidroxiclcanoatos (PHA)	Meridian/Kaneka	/	4.40 – 6.05	57.06 – 78.46
	Metabolix	50		
	Telles	50		
	Tianan	2		
Poliácido láctico (PLA)	Hi-Sun	5	1.90 – 6.70	24.60 – 86.90
	Inventa Fisher	60		
	Nature Works+	140		
	Purac	75		
	Teijin	5		
	Otros	7		
Biopolímero PLA, Ingeo 2003D grado extrusión	Nature Works	/	3.40	44.1
Polietileno verde (caña de azúcar)	Braskem	200	1.80 – 2.22	23.34 – 28.79
	Dow Chemical/ Mitsui	350		
Polietileno de Baja Densidad (HPDE)	/	/	1.21	15.69
Polipropileno (PP)	/	/	1.29	16.72
Polietileno tereftalato (PET)	/	/	.85	11.02
ABS	/	/	1.92	24.89

Fuente: Información acerca de bioplásticos obtenida de European Bioplastics y el IfBB (Octubre, 2012), disponible en línea en: <http://en.european-bioplastics.org/press/press-pictures/labelling-logos-charts/>. Información acerca de termoplásticos petroquímicos (Plasticker, 2012), disponible en línea en: http://plasticker.de/preise/preise_monat_single_en.php.

Conversiones realizadas acorde al tipo de cambio de MN\$12.9687 por dólar (consultado en Internet el 19/09/2013 en el Diario Oficial de la Federación (DOF)).

³⁹ Para hacer la proyección del costo del proceso de extrusión, se obtuvo asesoría en la empresa Plastilam S.A. de C.V. a partir de los costos para procesar termoplásticos reciclados con cargas orgánicas.

El aumento de productores y volumen de producción afectará necesariamente en un futuro no muy lejano el precio de los bioplásticos. La demanda de los bioplásticos ha aumentado y se proyecta que seguirá creciendo en los próximos años. Es posible apreciar que una producción a escala pequeña implica un aumento de costos y por lo tanto un aumento en el precio de los polímeros y biopolímeros. La escala de producción influye más en el costo, que el precio de la materia prima y los procesos químicos involucrados. Los mayores factores que afectan el costo en una escala de producción mayor, serán las materias primas y los procesos químicos. Esto se puede ver reflejado claramente en el tipo de fuente para obtener materia prima, ya que algunas compañías como Cargill Dow Polymers® prevén el uso de residuos agroindustriales como materia prima, lo cual ayudaría a bajar los costos, así como la posibilidad de reducir impactos ambientales relacionados con la siembra y procesamiento de los recursos (Food Biopack Project, 2000).

Tabla 41. Precio de las materias primas.

Descripción	Precio	
	USD / Kg	MN / kg
Biopolímero Ingeo 2003D grado extrusión	\$3.40	\$44.20
Fibra de agave tequilana (incluye corte/molienda \$2.5 pesos)		\$9.00
Aditivo acoplante Struktol TPW113	\$5.10	\$66.30
Costo de materias primas		\$119.5

USD – Dólar americano.

MN – Moneda nacional.

Tabla 42. Gastos directos de producción.

Descripción	Costo / kg (MN)
Mano de obra (3 personas)	\$11.00
Electricidad	\$3.50
Agua y otros	\$2.00
Total gastos directos / Kg	\$16.50

Tabla 43. Costo de producción por 1Kg de pellets de biocompuesto PLA/FAT.

Componentes						Total (MN)	Gastos directos (MN)	Costo total (MN)
PLA	Precio	Fibra	Precio	Aditivo	Precio			
100%	\$44.2	0%	\$0	1.5%	\$0.995	\$45.20	\$16.50	\$61.7
70%	\$30.94	30%	\$2.70	2.50%	\$1.6575	\$35.30	\$16.50	\$51.8
60%	\$26.52	40%	\$3.60	2.50%	\$1.6575	\$31.80	\$16.50	\$48.3
50%	\$22.10	50%	\$4.50	2.50%	\$1.6575	\$28.30	\$16.50	\$44.8
40%	\$17.68	60%	\$5.40	2.50%	\$1.6575	\$24.70	\$16.50	\$41.2

Es posible apreciar que al aumentar el contenido de fibra en el biocompuesto el costo disminuye, lo cual se presenta como una ventaja en este sentido, aunque la aplicación que se le dé al material determinará la composición que se pueda utilizar. En la **Tabla 43** se

puede observar que conforme se aumenta el contenido de fibra de la mezcla, el costo del biopolímero disminuye. En comparación con el procesamiento del PLA virgen, al agregar un 60% de fibra se logra reducir el costo un 33.2% lo cual repercute directamente en el precio de venta que tenga la materia prima por sí sola o al conformar un producto.

En la **Tabla 44** se proyecta como ejemplo, el costo de procesamiento para obtener una tabla rectangular de 100cm de largo x 10cm de ancho y 1cm de espesor, con una composición de 70% PLA y 30% FAT. Esta tabla pesa 1.6Kg, lo cual equivale a un costo de \$99.38 y un área de 0.1m², de esta manera 1m² costaría \$993.80, y equivaldría a aproximadamente 16Kg. Se puede apreciar que el costo del biopolímero PLA determina en gran medida el costo final del biocompuesto, como se mencionaba, se espera que el aumento de la demanda del PLA ayude en el futuro a disminuir los costos del producto. Por otra parte el precio del servicio de extrusión representa a la vez un gasto considerable, el cual se puede disminuir al aumentar el volumen de producción o asumir el papel del maquilador invirtiendo en la tecnología necesaria para procesar el material.

Tabla 44. Costo del procesamiento del biocompuesto PLA/FAT30.

Producto	Medidas (cm)	Peso (Kg)	Área (m ²)	Gastos Directos Extrusión (MN)	Costo (MN)	Costo / m ² (MN)
Tabla 70/30	100 x 10 x 1	1.6	0.1	\$16.50	\$99.38	\$993.80

El costo del biocompuesto PLA/FAT es alto en comparación con otros biocompuestos que utilizan polímeros petroquímicos y fibras como refuerzo. Sin embargo no se presenta como un material incosteable al presentar otras ventajas que sus contrapartes no tienen.

Los costos del procesamiento del biocompuesto PLA/FAT, para crear un perfil determinado, son sólo una referencia de una posible transformación del material para ser utilizado como producto o como parte de un producto. Al cambiar la aplicación y configuración del material, de igual manera los costos se verán alterados, lo cual debe tomarse en cuenta en el proceso de diseño para hacer más eficiente el uso del material y disminuir el costo de producción y por consecuencia el precio de venta.

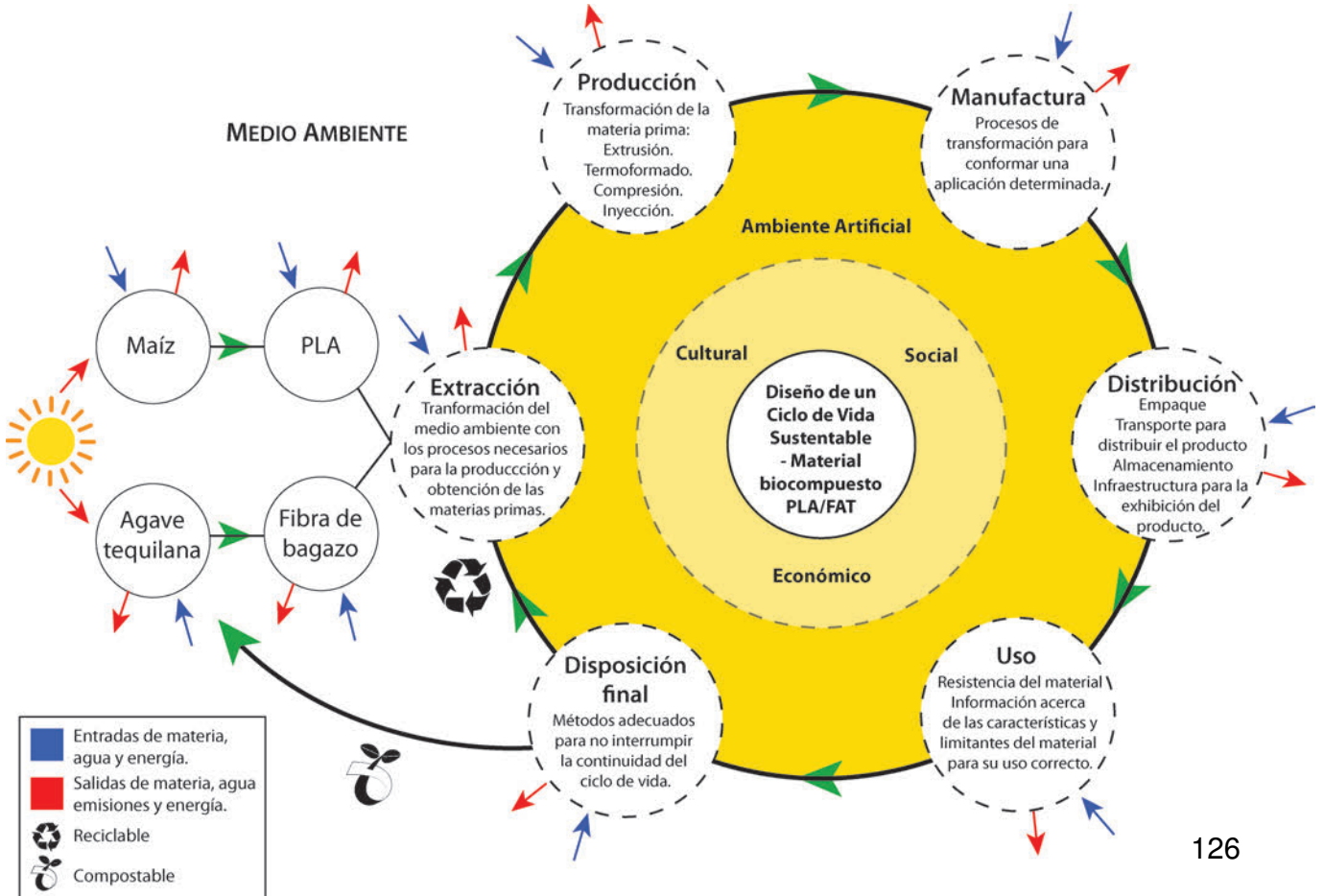
CAPÍTULO IV

Recomendaciones durante el Ciclo de Vida del Material Biocompuesto PLA/FAT

El conocimiento adquirido hasta este punto por medio de la investigación, experimentación, análisis e interacción con el material biocompuesto PLA/FAT, nos ha permitido definir un perfil del material de manera que se pretende hacer distintas recomendaciones para las etapas que conforman el ciclo de vida del material, queda descartado el uso de la metodología de Análisis del Ciclo de Vida (ACV) ya que no se analizarán los impactos ambientales del mismo.

Retomando el esquema del ciclo de vida de un material (ver **Figura 18**, pág. 68), podemos identificar de manera más específica las etapas del mismo en relación al biocompuesto PLA/FAT, en la **Figura 69** se describe el ciclo de vida del material, dentro del cual se ha comprobado la viabilidad de extracción y producción, lo que nos impulsa a cuestionar las demás etapas del ciclo. No se contempla llevar a cabo el diseño de una aplicación donde se utilice el material, pero se considera necesario analizar cada etapa del ciclo de vida del biocompuesto para concluir con recomendaciones para su funcionamiento óptimo. Cada etapa del ciclo de vida permanece como una caja negra, de las cuales sabemos que existen entradas y salidas de materia, agua, energía y emisiones, de tal forma que se producen impactos ambientales que afectan a todo el sistema.

Figura 69. Ciclo de vida del material biocompuesto PLA/FAT.



Al referirnos al funcionamiento óptimo del ciclo de vida del material, debemos contemplar que existen una gran cantidad de variables involucradas, lo cual implica que las recomendaciones emitidas no se presentan como determinantes, ni se supone una configuración única para que se conforme un ciclo de vida congruente con los objetivos para alcanzar un desarrollo sustentable. En este sentido para concebir el ciclo de vida es necesario contemplar las afectaciones al pilar social, cultural, económico y ambiental, sin olvidar que un análisis de esta magnitud sobrepasa los alcances de esta investigación, se incluyen en las recomendaciones como puntos importantes que no deben pasar desapercibidos y se mantienen como interrogantes de este proyecto así como de todo aquel relacionado con la construcción del ambiente artificial.

Las etapas del ciclo de vida del biocompuesto PLA/FAT describen una red de interacciones que conforman un sistema que ciertamente depende más que sólo de las acciones del campo del diseño, es determinante que se fomente el trabajo tanto interdisciplinar como multidisciplinar, para lograr la producción de medios coherentes con los objetivos del diseño para la sustentabilidad⁴⁰. La continuidad del ciclo de vida del material biocompuesto PLA/FAT depende de muchos factores ajenos a los intereses por un desarrollo sustentable, en la actualidad no se percibe una búsqueda unificada por solucionar los problemas que se derivan del deterioro del medio ambiente, ni mucho menos la relación con otros problemas que afectan a la sociedad. Esto se puede presentar como una limitante para lograr una mayor ecoeficiencia al momento de llevarse a cabo el ciclo.

En relación a la clasificación de los ecomateriales podemos identificar al biocompuesto PLA/FAT dentro de la categoría 1 Materiales Cíclicos, y la subcategoría A Materiales Reciclados y en la B Materiales Renovables (ver **Tabla 3**, pág. 40), de esta forma se retoma un sistema de clasificación antecedente que parte de objetivos congruentes con los del diseño ecológico y contempla materiales con características similares al material en cuestión. La denominación del biocompuesto PLA/FAT como ecomaterial expone ciertos vacíos, ya que no demuestra la cualidad ecológica ni su aportación a la sustentabilidad, sólo se manifiesta como un objetivo, porque el nivel hasta el que llega esta investigación no nos otorga argumentos suficientes para demostrar los beneficios que se contemplan durante el ciclo de vida de este material.

⁴⁰ Se considera pertinente hacer cita del refrán popular: “*Si los bueyes no están juntos la yunta se jala de lado*”.

4.1 EXTRACCIÓN

La etapa de extracción se presenta como el inicio de la transformación del medio ambiente para obtener los recursos naturales que se procesan para la producción de materias primas. En el caso de la extracción en el ciclo de vida del biocompuesto PLA/FAT, corresponde por una parte a la extracción de agave para el procesamiento del tequila a partir del cual se obtiene el bagazo como residuo y posteriormente la fibra, y por otra parte la extracción del maíz para obtener la dextrosa y sintetizar el ácido láctico para la producción de PLA. En ambas partes se requiere de la extracción de recursos agrícolas lo cual involucra una gran cantidad de variables para lograr la de estos recursos para la producción de material prima.

Fibra de bagazo *Agave tequilana*

En el caso del agave, la siembra y cosecha tardan hasta 8 años y aun cuando es una planta que resiste la sequía, se requiere de la aplicación de sustancias para combatir plagas y enfermedades, las cuales pueden implicar toxicidad a la tierra (Bautista Justo, Barboza Corona, y Parra Negrete, 2001). Diferentes impactos ambientales se pueden asociar al ciclo de vida del Agave, un ejemplo notable es el transporte. Desde la siembra, crecimiento y cosecha de la planta se necesita transportar para obtener insumos, así como movimiento de personas relacionadas con el proceso. Más adelante es necesario el traslado de las piñas para su cocimiento y molienda, una vez que se obtiene el bagazo de igual manera es necesario transportarlo al lugar donde se procesa para obtener la fibra, ya que en la mayoría de los lugares donde se produce tequila no se aprovecha el bagazo para obtener fibra. La entrada y salida de materia, energía, agua y emisiones ocurre desde la producción del bagazo, hasta la obtención de la fibra de bagazo de agave, lo cual implica distintos impactos ambientales que definen el perfil de esta materia prima.

Detrás de la industria que procesa el agave se encuentra una gran carga social que no podemos olvidar. El cultivo, cosecha, y procesamiento del agave dependen del trabajo de muchas personas que subsisten de esta agroindustria, estos impactos están fuera de nuestro alcance, pero siguen siendo parte del ciclo del vida del biocompuesto PLA/FAT. El procesamiento del bagazo también implica un impacto social lo cual se expone como una incógnita que debe ser estudiada y no debe pasar desapercibida.

La búsqueda por la disminución de los impactos ambientales durante el ciclo de vida de materiales como el biocompuesto PLA/FAT debe contemplar desde la complejidad del sistema general que describe el ciclo del material, hasta las partes específicas del mismo, ya que estos impactos son el reflejo directo de cualquier acción durante la “vida” del material.

Recomendaciones

- La producción de bagazo de agave tequilana se localiza principalmente en el Estado de Jalisco, donde también se procesa el bagazo del *Agave tequilana*, para disminuir el impacto ambiental que corresponde al transporte de la fibra hasta otro lugar para su procesamiento, se puede considerar establecer la producción del biocompuesto en este Estado.
- Aun cuando el objeto de este estudio sea el *Agave tequilana*, las características similares entre las plantas agaváceas otorga la posibilidad de diversificar las fuentes para obtener materia prima, algunos ejemplos podrían ser:
 - *Agave fourcroydes* – Producción de fibra de henequén.
 - *Agave vivipara* (“espadín”, “lechuguilla”, “marginata”) – Producción de mezcal.
 - *Agave angustifolia Haw* – Producción de mezcal.
 - *Agave americana*. – Producción de fibra textil y la bebida comiteco.

En todos estos procesos existe la producción de bagazo, así como el desecho de las hojas del agave, lo cual se puede aprovechar para producir fibra que actúe como agente de refuerzo en un material biocompuesto. Las hojas del agave se cortan al momento de la jima, se consideran un residuo, pero son aprovechadas para obtener fibras largas que se usan para fabricar textiles. Para obtener estas fibra también se produce bagazo, del cual podrían obtenerse fibras para actuar como agente de refuerzo, sin descartar la posibilidad de utilizar también las fibras largas para otro tipo de materiales biocompuestos.

- La información acerca de los impactos ambientales correspondientes al ciclo de vida del agave es muy escasa y no es de libre acceso, lo cual es un indicador de que se debe fomentar la investigación en este campo, con el fin de complementar el conocimiento acerca del impacto detrás de esta actividad, lo cual afecta a la asignación de flujos y emisiones del bagazo de agave.
- No se pretende hacer una conclusión acerca de la sustentabilidad detrás del uso del bagazo de agave, sería necesario realizar un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) para contar con información que pueda ayudar a argumentar en este sentido y su realidad como una materia prima apta para conformar ecomateriales. Tanto la información de un ACV, como de las pruebas realizadas en la experimentación, no se asumen como datos determinantes para la sustentabilidad del biocompuesto PLA/FAT, pero sí como parte del conocimiento necesario para lograr encaminar el desarrollo del material en este sentido.
- Se destaca la importancia de aprovechar residuos de fibras naturales para la elaboración de materiales, ya que se presentan como materias primas de bajo costo y que se producen en cantidades masivas, estos residuos tiene potencial para reforzar nuevos materiales biocompuestos.

PLA Poliacido láctico

La extracción de la materia prima para la producción de PLA depende principalmente de la siembra de maíz para obtener la dextrosa (azúcar) que se utiliza para elaborar el biopolímero. Con el objetivo de evitar el uso de cosechas destinadas a alimento, las empresas productoras como Nature Works™, han recurrido a la investigación para el uso de la biomasa residual agrícola para lograr la extracción de la dextrosa requerida para sintetizar el ácido láctico. Este esfuerzo está enfocado en la disminución del impacto ambiental durante el ciclo de vida de la producción de PLA, lo cual se espera que afecte de manera positiva al desempeño ambiental del material biocompuesto PLA/FAT.

De igual manera que el agave, la siembra de maíz y la producción de ácido láctico para fabricar él biopolímero PLA tiene una carga social que no debe pasar desapercibida. En este momento esta variable se presenta como una caja negra en la que sabemos que existe un flujo de información y una interacción directa con las variables del pilar económico. La producción de PLA implica beneficios que podrían afectar a México en lugar de países como Estados Unidos y China que son productores del biopolímero.

La investigación de T.H. Vink et al. presenta datos importantes que demuestran las ventajas del PLA frente a los plásticos petroquímicos, pero también expone los impactos ambientales relacionados con la producción del biopolímero, lo cual no debe pasar desapercibido (T.H. Vink, R. Rábago, A. Glassner, y R. Gruber, 2003) (ver **Anexo 14**. Impactos Ambientales en el Ciclo de Vida del PLA). Aun cuando el PLA presenta ventajas ambientales frente a los polímeros petroquímicos, no podemos descartar que la variabilidad durante el ciclo de vida de este material podría implicar que termine siendo una mayor carga ambiental, es necesario estudiar más el impacto ambiental durante el ciclo de vida de los biopolímeros y biocompuestos.

Recomendaciones

- El transporte de la materia prima se convierte en un factor de alto impacto ambiental durante el ciclo de vida del biocompuesto PLA/FAT, debido principalmente a que el PLA es un material importado ya que actualmente no se produce en México. Es necesario reducir las distancias de transporte para obtener esta materia prima, ya que puede ayudar a disminuir el impacto ambiental del biocompuesto PLA/FAT, en relación a la emisión de bióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero, así como el impacto ambiental que implica la fabricación del transporte que se utiliza. La producción nacional de biopolímeros no es una realidad lejana, ya que también se han realizado investigaciones sobre distintos métodos para la producción de ácido láctico (Pinto Hazael, Rodríguez Álvaro, 2012), lo cual podría implicar que en un futuro se pueda producir PLA en México que se traduciría en una reducción significativa en el costo de esta materia prima. El desarrollo de tecnología para la producción de biopolímeros también afectaría el desempeño ambiental del material, ya que al evitar el transporte de importación se logra disminuir el impacto ambiental por la emisión de gases de efecto invernadero lo cual sería más coherente con la denominación de los biocompuestos como ecomateriales.
- Las empresas que demuestran interés por optimizar sus procesos para tener una mejor ecoeficiencia representan una fuente importante de materia prima para desarrollar productos que expresan valores a favor de un desarrollo sustentable.
- No se puede dar por sentado el factor ecológico de las materias primas utilizadas, así como otros recursos, sólo mediante información como la que provee el ACV podemos argumentar el bajo impacto ambiental de un producto (objeto, servicio, material, etc.) y aun así quedan variables que este tipo de análisis todavía no contempla en su metodología como la afectación a la sociedad y la cultura.
- El desarrollo del campo de los biopolímeros presenta oportunidades que en un futuro aportarán nuevas alternativas para elaborar materiales compuestos biodegradables, la diversidad de biopolímeros comerciales permitirá no limitarse al uso del PLA como la única materia prima, así como la posibilidad de obtener diferentes características al utilizar otra matriz en el biocompuesto.

4.2 PRODUCCIÓN

La producción del biocompuesto PLA/FAT se ha experimentado mediante dos procesos, la extrusión y el moldeo por compresión, en ambos casos es indispensable la energía eléctrica para el funcionamiento de las máquinas, así como otros recursos. La cuestión acerca de los requerimientos energéticos para la producción del biocompuesto aborda un amplio contenido que no se pretende desarrollar a fondo, pero de manera general existen distintos factores que se podrían implementar en el proceso productivo. Para mayor información se recomienda la propuesta desarrollada por Graedel y Allenby acerca de la eficiencia energética en los procesos industriales (Design for Environment, 1996, págs. 19-32).

Recomendaciones

- **Materia Prima:** Es necesario un procesamiento adecuado de la materia prima antes de realizar una mezcla ya que esto determina el éxito de la integración de los componentes del biocompuesto. El secado de ambas materias primas es esencial para evitar que se formen gases al interior del material al momento de procesarlo, lo cual genera burbujas que forman poros, lo cual se presenta como puntos que comprometen el desempeño mecánico del biocompuesto. Se recomienda una revisión de la literatura disponible acerca de pretratamiento de fibras para la elaboración de compuestos, lo cual ha demostrado potenciar las propiedades de los materiales así como mejorar la interfaz entre matriz y agente de refuerzo.
- **Métodos:** Los métodos de producción comprobados son la extrusión y el moldeo por compresión, con más experimentación en el primero, tanto en la producción de láminas como perfiles, obteniendo resultados que nos permiten determinar de manera más verosímil las opciones de aplicación del material. Al determinar el método de producción limitamos el campo de aplicación en relación a la gama de productos que se pueden fabricar con los mismos, sin embargo no limita su posible procesamiento con otros métodos, ni que se considere como la única variable para determinar la aplicación del material.
- **Maquinaria:** La tecnología para procesar el biocompuesto PLA/FAT se presenta como un factor determinante de la calidad del resultado. Las características de las materias primas demostraron que al procesarlas en maquinarias industriales fue fácil degradarlas en el transcurso de la extrusión. En este sentido se recomienda el uso de tecnología actualizada para la extrusión de polímeros termoplásticos, la cual tiene potencial para mejorar notablemente las características de los biocompuestos, así como también obtener mejor eficiencia energética durante el proceso.
- **Parámetros de extrusión:** Los parámetros de extrusión para el biocompuesto PLA/FAT fueron variables al comparar los datos utilizados en la experimentación a nivel laboratorio y a nivel industrial. La temperatura a la cual la materia prima cambia de estado no cambia, lo que es diferente es la forma en que esta se procesa de una máquina a otra, lo cual nos indica que al cambiar la tecnología de procesamiento se modifican los valores de los parámetros de extrusión. Los datos obtenidos en el análisis DSC y TGA nos permiten conocer las propiedades térmicas del material para su correcto procesamiento.
- **Requerimientos de energía:** La energía necesaria para la producción de cualquier termoplástico es alta, lo cual expone la dependencia de la electricidad y de los combustibles fósiles. Se recomienda realizar un análisis energético de la producción del biocompuesto y la posibilidad de utilizar energía a partir de recursos renovables, lo cual permitiría poder argumentar con mayor certeza la sustentabilidad de los materiales biocompuestos biodegradables como el PLA/FAT, así como complementar un Análisis de Ciclo de Vida del material.
- **Reciclaje de residuos:** Durante el proceso de producción del biocompuesto se generan residuos preconsumo, como por ejemplo al momento de formación del material, así como una vez formado al existir piezas defectuosas. Todos estos residuos preconsumo se pueden introducir

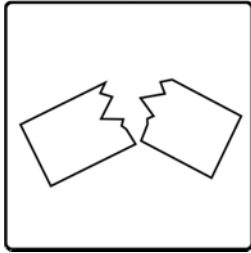
nuevamente dentro del proceso productivo para obtener piezas fabricadas con biocompuesto reciclado PLA/FAT.

4.3 MANUFACTURA

La etapa de Manufactura de un producto en muchos casos se presenta en el mismo lugar donde ocurre la producción, en otros casos la producción da como resultado el producto final listo para distribuirse. En el caso del biocompuesto PLA/FAT pueden presentarse ambos casos, se puede considerar como el producto final las láminas, perfiles, etc. o bien se puede manufacturar algún otro producto a partir de estos materiales. En cualquiera de los casos la conformación de una línea de producción se convierte en un factor clave que puede afectar a la generación o disminución de impactos ambientales. El biocompuesto PLA/FAT se puede someter a distintos procesos de transformación, de los cuales no se han experimentado todas las posibilidades existentes, pero ha demostrado ser un material versátil al momento de transformarlo.

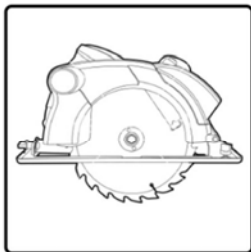
Recomendaciones

UNIÓN



- Para evitar el uso de pegamentos, se puede realizar la *termofusión*⁴¹ de dos partes, por medio de una herramienta que calienta el material hasta su punto de fusión.
- El ensamble del material es posible de ser maquinado para formar las piezas de forma similar a la madera.
- Las uniones pueden realizarse por medio de tornillería.
- Es importante tomar en cuenta que no se debe realizar la unión permanente del material con ningún polímero petroquímico, ya que esto tendría consecuencias negativas para el reciclado y compostaje del material.

CORTE



- Se pueden utilizar discos de corte para uso general, regulando la velocidad para evitar que el disco se atasque por la fundición del material.
- Maquinaria probada: Sierra radial, sierra de banco, sierra de mano, sierra cinta, router, etc.
- Los residuos generados se pueden recolectar para ser reciclados.

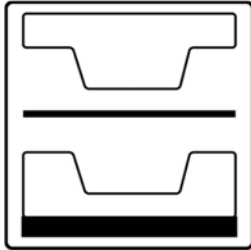
BARRENADO



- Utilizar brocas para perforar metal, moderar la velocidad (en el caso del taladro de banco) para evitar el sobrecalentamiento del material.
- La principal limitante para el barrenado puede ser el espesor del material ya que esto podría influenciar la ruptura de la pieza al ejercer demasiada presión para hacer el barreno.
- Los residuos generados se pueden recolectar para su reciclaje.

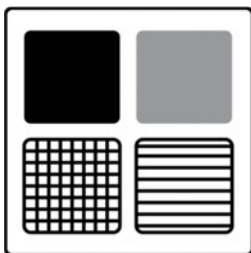
⁴¹ La termofusión es un proceso para unir dos polímeros termoplásticos por medio de la aplicación de calor y presión, desarrollado en la empresa Plastilam S.A. de C.V.

FORMADO



- Es posible el termoformado del material, por una parte utilizando un molde para aplicar calor y vacío a una lámina. Por otra parte se puede doblar el material por medio de la aplicación de calor equivalente a más de 60 °C, se comienza a reblandecer el material y puede adoptar una forma dada al enfriarse.
- En la experimentación realizada en el CICY se pudo comprobar que el moldeo por compresión del biocompuesto previamente extruido es posible al contemplar la temperatura necesaria para alcanzar el punto de fusión sin degradar el material.
- La flexibilidad del material es variable, pero en ciertos calibres podría ser un método para formarlo y darle una aplicación sin la necesidad de consumir energía al elevar la temperatura del material para poder doblarlo. Las láminas en espesores mayores a 2mm se tornan más quebradizas lo cual limita su doblado.

ACABADO



- El color natural del material se encuentra en una gama de color café en distintos tonos lo cual varió en parte debido a la maquinaria utilizada en el proceso de extrusión.
- Para colorar el biocompuesto PLA/FAT se puede utilizar master batch en base de Polietileno, o colorante en polvo. La gama de colores que se puede obtener está limitada por la mezcla con el color original que es el café.
- La textura de la superficie se puede obtener desde brillante y lisa, hasta rugosa y áspera, lo cual varía en relación al proceso de producción:
 - En el caso de la laminación los rodillos de la calandra determinan el acabado del material con lo cual se puede obtener un acabado liso mate o un acabado texturizado.
 - En el proceso de moldeo por compresión se pueden obtener acabados más uniformes, obteniendo superficies lisas y brillantes.
- El desbaste del material demuestra la posibilidad de lijarlo, así como otras acciones, pero al hacerlo las superficies adquieren un tono pálido, denotando resequedad, para lo cual se aplicó una capa de aceite de linaza que permitió recobrar un tono café oscuro.
- No se excluye que existe la posibilidad de aplicar un acabado, como un recubrimiento para la protección del biocompuesto, pero sin duda estas sustancias pueden afectar la biodegradabilidad del material por lo cual no se recomiendan. Las sustancias como las resinas epóxicas o los recubrimientos de poliuretano tienen un alto nivel de integración con los materiales, lo cual se vuelve una limitante importante al querer separarlo para su reciclaje o compostaje. Otro factor que no se debe obviar es la emisión de compuestos volátiles orgánicos (CVO) por la aplicación de acabados basados en las resinas urea formaldehído, como pinturas, barnices para madera, etc.

Estas recomendaciones pueden servir como una introducción a la manufactura del biocompuesto PLA/FAT, ya que existen procesos y métodos que no se han experimentado, por lo cual no se tomaron en cuenta, es necesario continuar con la investigación acerca de estos cuestionamientos para poder complementar el conocimiento generado en este documento. La manufactura necesariamente debe estar enfocada a la producción de un producto determinado lo cual nos motiva a preguntar ¿Qué aplicación se le puede dar al biocompuesto PLA/FAT? Los alcances de esta investigación no contemplan el diseño de una aplicación para implementar el material biocompuesto, sin embargo se presenta una revisión acerca de posibles criterios para su aplicación.

Criterios de Aplicación

En el caso de implementar cualquier estrategia de diseño de ciclo de vida sería necesario identificar la categoría del producto para la que se diseña. Una forma de clasificación general, correspondería a tres tipos de diseño en relación al tiempo de vida de los productos:

- Diseño a corto plazo: Desechables, envolturas, empaques, vasos, jeringas, etc.
- Diseño a mediano plazo: Celulares, radios, televisiones, etc.
- Diseño a largo plazo: Muebles, automóviles, aviones, edificios, etc.

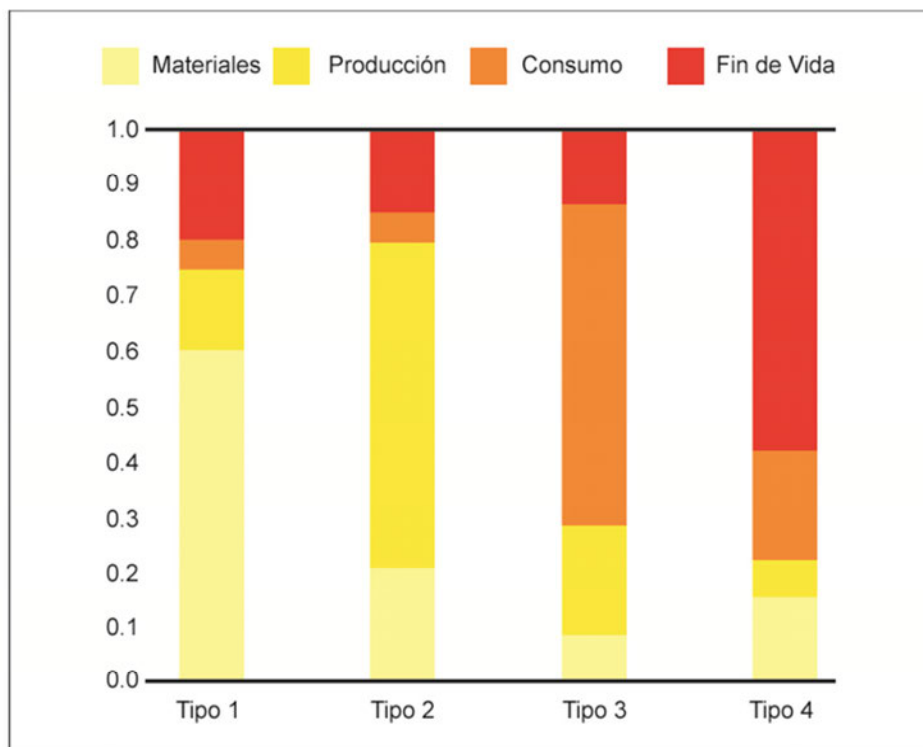
En este sentido Manzini y Vezzoli (2008, págs. 68-69) categorizan de la siguiente manera los productos, asignando consideraciones en relación a los posibles impactos ambientales:

- **Bienes de Consumo** (bienes desechables) / Corto plazo:
 - Bienes que se desgastan como la comida o el líquido para lavar platos, no tiene sentido hacerlos más durables. Lo importante es minimizar el consumo de recursos y elegir recursos de bajo impacto ambiental.
 - Bienes desechables que pueden ser reusados, reciclados o sustituidos, por ejemplo los empaques, periódicos, vasos desechables. Estos productos tienen un mayor impacto ambiental durante la etapa de producción y disposición final. Una estrategia podría ser extender su tiempo de vida para que se puedan reutilizar de manera parcial. Por otra parte se puede optar por mejorar las características de disposición final del producto, por ejemplo los materiales que son biodegradables o de fácil reciclaje.
- **Bienes Durables** (bienes reusables) / Mediano y largo plazo:
 - Bienes que consumen pocos o ningún recurso durante su uso (bicicletas, muebles). Su impacto ambiental ocurre principalmente en la (pre-) producción, distribución y disposición final. Es prioritario minimizar el impacto ambiental en el consumo de recursos durante la producción y la distribución. El impacto de la disposición final puede minimizarse extendiendo el tiempo de vida de los materiales al fomentar el reuso, pero frecuentemente es más eficiente extender el tiempo de vida del producto, especialmente en el caso de la obsolescencia cultural.

Otra clasificación notable es la realizada en el módulo H, del documento D4S (Design for Sustainability), en el cual se definen cuatro tipos generales (**Figura 70**) de producto en relación a cuatro factores: materiales, producción, consumo y fin de vida (Young, 2002) citado por (Delft University of Technology, 2009, pág. 132).

- **Tipo 1:** Tiene un tiempo de vida corto e intensidad material alta. Por ejemplo el uso de un empaque correspondería a este tipo de producto.
- **Tipo 2:** Tiene un tiempo de vida relativamente más largo, pero es más intenso en la parte de producción. Las computadoras portátiles y las cámaras digitales son ejemplos de productos de este tipo.
- **Tipo 3:** Este tipo de producto tiene un tiempo de vida considerablemente más largo, un ejemplo serían los automóviles.
- **Tipo 4:** Este tipo de productos corresponden a aquellos con características particulares para su disposición final, ejemplos de esto pueden ser los pañales o las baterías de Ni-Cd (níquel – cadmio).

Figura 70. Clasificación de productos en relación a cuatro factores del ciclo de vida.



Fuente: (Delft University of Technology, 2009, pág. 132).

*El eje X corresponde a una escala de referencia, para comparar la diferencia de magnitudes entre cada factor.

En las dos clasificaciones presentadas se puede apreciar que las categorías generalizan la diversidad de tipos de producto dentro de un mismo subgrupo, su utilidad reside en dar un panorama general para orientar las recomendaciones de aplicación. Claramente las diferentes formas de clasificación de los productos dependen del sistema de referencia que se utiliza, lo cual implica que no son determinantes, sólo pretenden esquematizar fragmentos de la realidad. Como guía tomaremos la clasificación de Young ya que se relaciona directamente con el diseño del ciclo de vida.

La aplicación de los materiales biodegradables ha ocurrido principalmente en el campo del empaque y los productos desechables, en la **Tabla 45** se enlistan algunos ejemplos de productos fabricados con bioplásticos biodegradables.

Tabla 45. Ejemplos de productos biodegradables actualmente en el mercado.

Material	Producto	Proceso de Fabricación	Empresa	Tipo de Producto (clasificación de Young, 2002)
Poliácido láctico PLA	Película	Calandrado	Toray ECODEAR	1
	Empaque	Inyección Extrusión / Termoformado	Going Green Solutions EcoWare	1
	Cubiertos	Inyección	Going Green Solutions	1
	Botellas	Inyección Soplado	You Cheng Plastic Enterprise Co., Ltd.	1
	Charolas	Espumado	Dyne-a-pak Inc.	1
	Industria médica y farmacéutica <ul style="list-style-type: none"> • Tratado de Heridas • Empaque • Aparatos Ortopédicos • Prótesis • Aplicaciones Dentales • Aplicaciones Cardiovasculares • Aplicaciones Intestinales • Sistema de entrega de medicina • Ingeniería de tejido 	Inyección Extrusión Extrusión de filamentos	Wipak Sigma-Aldrich (Resomer)	1 2
	Industria textil	Calandrado	Handan Baopeng Trading Co.	3
Fécula de Maíz	Cubiertos	Moldeo por compresión	Going Green Solutions	1
	Plumas	Inyección	Lecce Pen Pen	2
	"Cacahuete" para empaque	Espumado	Bio Fill	1
Caña de azúcar	Platos	Moldeo por compresión	Nanning Zong Xun Import y Export Trade Co., Ltd.	1
	Tazón	Modelo por compresión	Eco Sencia	1
	Charola	Moldeo por compresión	Shaoneng Group Co.	1
	Vaso	Moldeo por compresión	Ecodis	1
	Desechables	Inyección	Birorene	1
Polisacáridos	Celofán	Moldeo por compresión		1

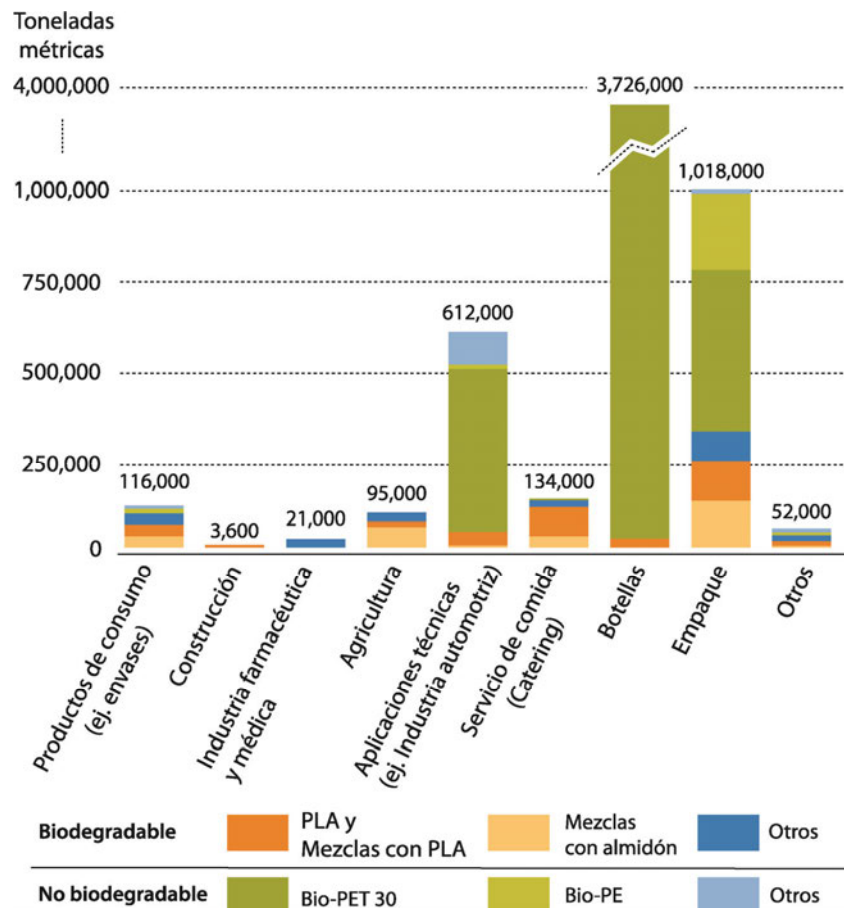
Fuente: Elaboración propia a partir de la consulta de empresas relacionadas con la producción o distribución de los productos presentados. También se complementó con información del siguiente artículo (Biodegradable polyesters for medical and ecological applications, 1999).

Estas aplicaciones han tenido buenos resultados, ya que los biopolímeros han podido responder a un tiempo de vida corto (tipo1) y al poder biodegradarse pretenden evitar la acumulación de residuos sólidos, pero esto depende de que se realice correctamente su disposición final, lo cual se presenta como una incógnita para la persona que utiliza alguno de estos productos. Podemos apreciar que la mayoría de los ejemplos corresponden a un ciclo de vida corto, pero no debemos descartar la posibilidad de que el biocompuesto PLA/FAT se utilice en productos con un ciclo de vida más largo, ya que tiene características que lo pueden permitir. Los biopolímeros biodegradables no han sido utilizados significativamente para fabricar productos que tienen un tiempo de vida más largo, como los objetos con características similares a las del tipo 2 y tipo 3, no podemos descartar el potencial que tienen estos materiales, así como el biocompuesto PLA/FAT para utilizarse en otro tipo de aplicaciones. La investigación y desarrollo de material biocompuestos reforzados con fibras naturales ha demostrado que

se pueden obtener materiales con mejores propiedades, que no tardaremos en estar usando antes de que nos demos cuenta de lo que son.

La investigación en bioplásticos ha generado información importante acerca de la producción actual de bioplásticos en relación con sus aplicaciones. La asociación de Bioplásticos Europeos⁴² (European Bioplastics) y el Instituto para los Biopolímero y Biocompuestos (Institute for Biopolymers and Biocomposites IfBB) hicieron en el año 2012 una proyección de la capacidad de producción mundial de bioplásticos por aplicación para el año 2016. En la **Figura 71** podemos apreciar que el empaque y el envase, en específico las botellas, serán los usos más demandados lo cual confirma la tendencia mencionada por hacer productos con un tiempo de vida corto. Cabe destacar que las aplicaciones en la industria automotriz tienen una participación importante que ha ganado interés a partir de la expansión de los biopolímeros y experimentación con biocompuestos reforzados con fibras naturales.

Figura 71. Producción de bioplásticos por aplicación para el 2016.



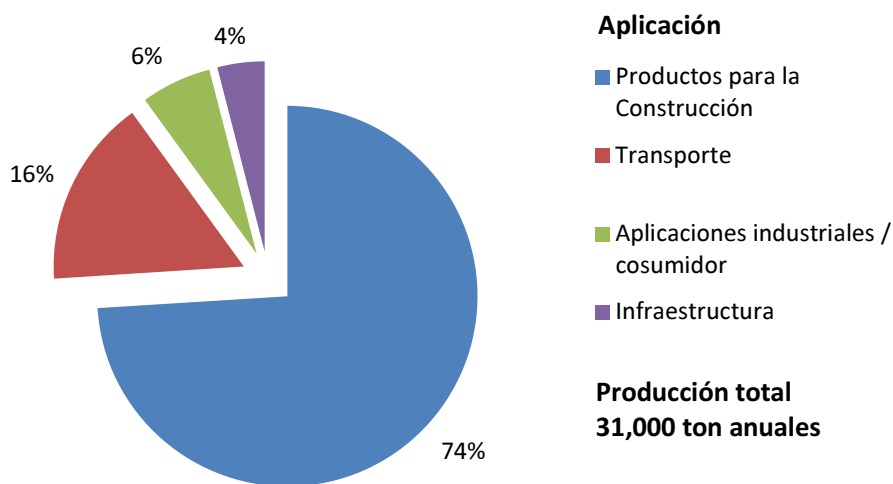
Fuente: Elaborado por European Bioplastics y el IfBB (Octubre, 2012), disponible en línea en: <http://en.european-bioplastics.org/press/press-pictures/labelling-logos-charts/>.

⁴² La asociación de Bioplásticos Europeos (European Bioplastics) y el Instituto para los Biopolímero y Biocompuestos (Institute for Biopolymers and Biocomposites IfBB) conforman un conglomerado de alrededor de 70 empresas de diferentes partes de Europa, que representa los intereses de la industria química, agricultores, distribuidores, fabricantes, etc. con el objetivo de promover el uso de los bioplásticos y fomentar esta industria en crecimiento.

Es importante observar que el mercado de los bioplásticos está dominado por los de origen natural pero que no son biodegradables, como el Bio-PET 30 y el Bio-PE⁴³, lo cual también habla de que la mezcla de biopolímeros con polímeros petroquímicos ha sido exitosa en el mercado y todavía tiene camino por recorrer, ya que se estima un crecimiento del mercado de los biopolímeros no biodegradables de más del 47% para el año 2018 (Centro Empresarial del Plástico, 2013, pág. 53).

Es importante notar que en la información presentada se mencionan productos donde se utilizan únicamente los biopolímeros, no se incluyen biocompuestos reforzados con fibras naturales, pero aun así nos sirve como una referencia en relación a la aplicación de materiales biodegradables, donde se incluye el PLA. De manera más específica en la **Figura 72** se presenta información de la aplicación de materiales compuestos reforzados con fibras naturales, en relación al mercado norteamericano (producción de 31,000 toneladas anuales, 2005), en el cual dominan los productos para la construcción con un 74%, después el transporte con 16%, las aplicaciones industriales y para el consumidor un 6% y para la infraestructura un 4% (Mohanty, Misra, y Drzal, 2005, pág. 249). Aunque esta información no nos otorga una perspectiva más amplia a nivel mundial, sí refleja de manera relevante las aplicaciones recientes que se le ha dado a los materiales compuestos reforzados con fibras naturales, que en contraste con los biopolímeros dominan los productos con un tiempo de vida considerablemente más largo.

Figura 72 Aplicaciones para materiales compuestos reforzados con fibras naturales en EUA.



Fuente: (Mohanty, Misra, y Drzal, 2005, pág. 249).

Estos datos no hacen referencia a la aplicación de biocompuestos biodegradables, pero reflejan el papel activo de las fibras naturales en el mercado de los materiales compuestos. Existen distintos campos de aplicación con potencial para implementar el biocompuesto PLA/FAT, pero no se puede perder de vista que las propiedades del mismo determinan en gran medida su factibilidad. Como anteriormente se había evidenciado, el biocompuesto PLA/FAT funciona de manera óptima en ambientes interiores donde no haya exposición a la luz solar durante tiempos prolongados, así como a la humedad, estas limitantes no impiden que el material pueda ser utilizado, sino que expone que hace falta más investigación y desarrollo para obtener materiales con características adecuadas para ampliar el rango de aplicaciones que nuestra capacidad dicta como posible.

⁴³ El Bio-PE se produce a partir del alcohol de caña de azúcar. El Bio-PET30 se puede producir de diferentes fuentes vegetales, ambos bioplásticos no son biodegradables.

4.4 DISTRIBUCIÓN

La distribución de cualquier producto es necesaria para lograr su comercialización, ya sea de manera local o global, esta etapa presenta distintos requerimientos para lograr que los productos estén al alcance de las personas, no sólo el consumo de energía para el funcionamiento del transporte, sino también los recursos utilizados para producir ese transporte. Podemos considerar de manera general que durante esta etapa ocurren los siguientes aspectos:

- Empaque del producto.
- Transporte del producto.
- Almacenamiento del producto.
- Exhibición del producto.

El empaque también puede ocurrir al finalizar la etapa de producción, pero depende del tipo de producto en cuestión. El empaque de productos se utiliza con distintos objetivos, por una parte sirve para evitar que el producto se dañe y sea fácil de transportar, por otra parte también se usa como medio publicitario para atraer a las personas. Existen una gran variedad de empaques y materiales utilizados para elaborarlos, la principal problemática que presentan es que estos objetos tienen un tiempo de vida muy corto, lo cual contribuye sustancialmente a la acumulación de residuos sólidos (ver **Anexo 7. Residuos Sólidos Urbanos**). En este sentido la optimización del empaque se debe enfocar en utilizar la cantidad mínima posible para ser funcional y escoger materiales que sean fáciles de reciclar o degradar.

La distribución del biocompuesto PLA/FAT se presenta como una caja negra, en la cual sabemos que existen entradas y salidas de materia, energía, agua y emisiones, pero no contamos con un producto que se esté distribuyendo, ni con una cuantificación de los procesos que ocurren para determinar los impactos ambientales del mismo. Durante todo el ciclo de vida de un material se requiere de transporte, pero se enfatiza el hecho de que el producto se necesita distribuir hacia los puntos de venta para comercializarlo. A la etapa de distribución también se le asocia el almacenamiento de los productos, de manera que también influyen los recursos necesarios para producir la infraestructura de almacenamiento, así como el consumo de luz, agua, e incluso sistemas de climatización, para resguardar los productos. El almacenamiento del producto también puede requerirse después del empaque, como por ejemplo en el caso de no realizarse una distribución inmediata y que se esté surtiendo el inventario, de igual manera en el momento de exhibirlo en el punto de venta, donde también se almacena el producto.

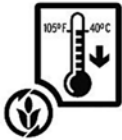
Las fases mencionadas dibujan un esquema general de la etapa de distribución, pero en realidad se ramifica en muchos otros factores que pueden ser variables.

Recomendaciones

- Utilizar la cantidad mínima de materiales de empaque para evitar que el producto se dañe durante la distribución. Se recomienda que los materiales de empaque no sean a partir de plásticos petroquímicos, se puede recurrir a distintas opciones, como aquellas elaboradas a partir de materiales reciclados.
- La logística de transporte se debe enfocar en obtener la mejor eficiencia en consumo de combustible y tiempo.
- Fomentar el uso de vehículos impulsados por energías alternativas a los combustibles fósiles, así como las tecnologías híbridas.
- El manejo y almacenamiento del producto debe contemplar las siguientes precauciones, para lo cual la empresa Nature Works™ presenta una iconografía que podría utilizarse para etiquetar el empaque de un producto con el biocompuesto PLA/FAT, para informar correctamente acerca de

estos aspectos ya que presenta una gran similitud en la manera a que responde a ciertos elementos (**Figura 73**).

Figura 73. Recomendaciones para el manejo y distribución del biocompuesto PLA/FAT.



- Evitar temperaturas altas, almacenar a menos de 40 °C.
- En su transporte se debe evitar largas exposiciones al sol, por lo cual se deben procurar programar el transporte en los momentos menos cálidos en el día.



- No exponer a la luz directa del sol.
- En el caso del empaque de frutas y verduras. se debe programar una entrega "Just in time" (justo >a tiempo) para garantizar la integridad del producto, (no se excluye la posibilidad de que el biocompuesto se pueda utilizar en este campo de aplicación).



- Almacenar en la parte inferior de los anaqueles, para que se mantenga en la parte más fría del almacén
- No almacenar cerca de tragaluzes o calentadores.



- Manejar con cuidado.
- Almacenar en el interior al recibir el producto.
- No dejar el producto en el cargamento durante mucho tiempo.

4.5 Uso

El uso del material es la etapa durante el ciclo de vida, en la cual la funcionalidad del mismo se pone a prueba, de cierta manera es la razón por la cual se crea un producto, para que este se utilice, en las diferentes variantes que esto pueda implicar. Las pruebas de formación y transformación del biocompuesto PLA/FAT, así como el análisis de algunas de las propiedades del material, demuestran que tiene potencial para utilizarse en distintas aplicaciones. La producción y la caracterización del material no determinan todas las aplicaciones y usos se le puede dar, ya que no conocemos todos los límites, ni todas las posibilidades de producción para la aplicación del mismo o la reacción del usuario ante el material como parte de las variables cualitativas, sin embargo no hay necesidad de establecer límites acerca de lo que podría hacerse con el mismo, el conocimiento generado permite partir de datos cuantitativos y cualitativos que delinear ciertas características que por sí mismas establecen límites que es necesario tomar en cuenta al momento de usar el material en cualquier aplicación (**Figura 74**).

El uso de un objeto implica necesariamente en algún momento el desecho del mismo, de manera independiente al tiempo de vida del objeto, o al sistema en el que se utilice (como en un servicio). La persona que adquiera un producto con el biocompuesto PLA/FAT, debe estar informada acerca de la mejor forma para desechar el material para evitar la interrupción del ciclo de vida.

Recomendaciones

Figura 74. Precauciones a tomar para el uso del biocompuesto PLA/FAT.



- El uso del material en ambientes donde se alcancen temperaturas mayores a 40 °C causará deformación en las piezas expuestas durante tiempos prolongados.



- No exponer a la luz directa del sol.
- No dejar el material expuesto a la luz solar durante tiempos prolongados. Con el paso del tiempo puede ocasionar la deformación de las piezas, así como su decoloración.



- No exponer directamente a la flama, material inflamable.
- No colocar materiales calientes sobre el producto, como ollas, utensilios, etc.



- Los cuidados generales para plásticos petroquímicos aplican para el biocompuesto PLA/FAT.
- No limpiar el material con ningún producto de limpieza para superficies, sólo se necesita un paño húmedo para darle mantenimiento.



- No se recomienda sumergir el material en el agua, ni exponerlo constantemente a líquidos o ambientes con un alto índice de humedad, ya que puede causar la deformación de la pieza debido a su carácter higroscópico.
- En caso de exposición al agua, secar la superficie con un paño seco y dejar que el material pierda la humedad a temperatura ambiente.
- La exposición temporal del material al agua no implica el inicio de su biodegradación.

4.6 DISPOSICIÓN FINAL

La etapa de disposición final se presenta como crucial para que el ciclo de vida del biocompuesto se complete adecuadamente, de tal manera que no se convierta en potencial generador de otros impactos ambientales. La denominación correcta para el material PLA/FAT sería la de un biocompuesto compostable, ya que requiere de la acción de microorganismos y condiciones específicas de calor y humedad para poder degradarse.

Los principales motivos por los cuales se desecha un producto, y por lo tanto los diversos materiales que lo integran, pueden asociarse con los siguientes puntos:

- Degradación del desempeño y fatiga estructural debido al uso normal del producto.
- Degradación debido a factores medioambientales o químicos.
- Daño causado por accidentes o uso indebido.
- Daño debido a errores de manufactura o calidad.
- Obsolescencia tecnológica.
- Obsolescencia estética o cultural⁴⁴.

La disposición final de los materiales biodegradables es una etapa del ciclo de vida que no podemos trivializar, actualmente los plásticos biodegradables u oxodegradables, no cuentan con una simbología unificada que permita su identificación, por lo que se recurre a la iconografía utilizada para los termoplásticos petroquímicos, identificándolos con el 7, que se denomina comúnmente como otros, en este caso se indicaría el tipo de biopolímero. La falta de información acerca del tipo de material de una pieza afecta al proceso separación de los residuos plásticos, e implica un posible factor de contaminación para el reciclaje de polímeros petroquímicos, ya que se pueden confundir con estos materiales. Podemos encontrar que existen muchos objetos de plástico que ni siquiera incluyen el icono correspondiente, o al menos una leyenda con la información pertinente. La simbología que considera la ISO no aporta toda la información que se necesitaría transmitir tanto a la persona que utiliza el producto, como a aquellos involucrados en la recolección de residuos.

Figura 75. Sistema de Identificación de Termoplásticos.



Fuente: Información sobre la simbología considerada por la ISO 11469, citado en (Ecojoguina: Diseño Ecológico de Juguetes, 2009).

* Representado también con O de otros.

Se considera necesario que los productos que se fabriquen con el biocompuesto PLA/FAT, presenten los siguientes datos aun cuando se piense recurrir a una simbología aprobada por un organismo normativo:

- Método de biodegradación que corresponde al compostaje.
- Tipo de biopolímero.
- Grado de concentración de fibra.
- Número de veces que se ha reciclado.

⁴⁴ La obsolescencia tecnológica y estética, son parte del fenómeno de la obsolescencia programada y percibida. Los productos que operan dentro de un contexto de alta tecnología e innovación constantes son vulnerables a ser obsoletos tecnológicamente en un lapso de tiempo corto, aun cuando sigan funcionando. La obsolescencia estética ocurre a la par de la tecnológica, al introducir una nueva estética en un producto para implementar las mejoras tecnológicas, de manera que la estética del modelo anterior se vuelve obsoleta para la persona que lo usa.

Retomando los distintos escenarios que plantea Michael Ashby para el momento en que se desecha un producto, los cuales denomina “*opciones de fin de la primera vida*” (*End of first life options*), se presentan las opciones de disposición final para el biocompuesto PLA/FAT (**Tabla 45**). Se habla del fin de la primera vida ya que por ejemplo, una vez que se recicla el biocompuesto y se produce un producto que inicia un segundo ciclo de vida, al culminar todas las etapas del mismo entonces regresaríamos a la disposición final con lo que se podría denominar como las opciones de fin de la segunda vida del material.

Las opciones de disposición final que mejor responden al objetivo de dar continuidad al ciclo de vida del biocompuesto PLA/FAT son el reciclado y el compostaje, el cual no se menciona en la clasificación original que hace Ashby, debido a que dentro de los materiales postconsumo que están considerados (como los polímeros petroquímicos, metales, madera, etc.) no se contempla a los biopolímeros, biocompuestos o residuos orgánicos.

Una gran ventaja del reciclado del biocompuesto PLA/FAT es que no requiere de un proceso especializado para realizarse, se considera que sería necesario someter los residuos al siguiente procedimiento general:

- Limpieza.
- Separación de diferentes grados del material o mezcla de tipos.
- Molienda.
- Secado.
- Procesamiento.

Al producir otro producto a partir de los residuos del biocompuesto, se da inicio a un nuevo ciclo que ayuda a disminuir el consumo de materia prima para la fabricación del producto, en este sentido surge el cuestionamiento acerca de cuántos ciclos de reciclado puede soportar el biocompuesto PLA/FAT sin perder propiedades que afecten su funcionalidad.

En un estudio piloto del Instituto Nacional de Ecología (INE) realizado en el año 2005, se identificaron 61 plantas de compostaje que estaban operando o que funcionaban en algún momento en México. El enfoque del estudio fue la zona centro del país, así es que los resultados no reflejan la totalidad de las actividades a nivel nacional; es de esperarse que hayan existido y existan más plantas en el resto del país. Las plantas de compostaje en México presentan la oportunidad de respaldar la etapa de disposición final del material cuando este ya no tiene la posibilidad de reciclarse, para entonces procesarlo como un residuo orgánico.

Aun cuando el biocompuesto PLA/FAT se pueda reciclar o biodegradar por medio de compostaje, debemos contemplar que si el volumen de implementación de biopolímeros y biocompuestos biodegradables aumenta considerablemente con el paso del tiempo, también deberá haber un aumento en la infraestructura necesaria para responder a la demanda de procesamiento de estos materiales, ya que también tienen el potencial para ocasionar un problema de acumulación de residuos.

Tabla 46. Opciones de fin de la primera vida para el biocompuesto PLA/FAT.

Opciones Fin de vida	Descripción
Relleno sanitario	<ul style="list-style-type: none"> • Esta opción se ha utilizado extensamente, pero expone la limitante de la cantidad disponible de espacio para rellenar. • No se recomienda esta opción ya que se interrumpe el ciclo de vida del biocompuesto al impedir o retardar la biodegradación del material.
Incineración o combustión para la recuperación de calor	<ul style="list-style-type: none"> • Los materiales que conocemos, contienen energía. En lugar de tirarlos simplemente a la basura, se puede obtener y reusar parte de esta energía por medio de combustión controlada, capturando el calor. • Primero es necesario separar los materiales combustibles y los que no son combustibles. Después la combustión debe llevarse a cabo bajo ciertas condiciones para no generar emisiones tóxicas o residuos, requiriendo altas temperaturas, control sofisticado y maquinaria de costo elevado. • El proceso de recuperación de energía tiene limitantes, en parte porque el residuo recuperado tiene un contenido de humedad que tiene que ser evaporada. La eficiencia de la recuperación de calor del proceso de combustión es a lo mucho del 50%, y si ese calor es utilizado para la recuperación de energía, disminuye hasta el 35%.
Reciclaje	<ul style="list-style-type: none"> • El reciclaje es el reprocesamiento de materiales recuperados al final de la vida del producto (y también preconsumo), para volver a introducirlos en el flujo de uso. • Es la opción mejor adaptada para extraer valor de los residuos. • El biocompuesto PLA/FAT es 100% reciclable, permitiendo volver a formar productos a partir de los residuos, durante un número determinado de ciclos ya que los materiales tienden a perder propiedades en este proceso.
Reingeniería o Reacondicionamiento	<ul style="list-style-type: none"> • Es la restauración, para algunos productos es costeable, y comparado con el remplazo total, es energéticamente eficiente. Depende del tipo de producto y daño a reparar. • Para facilitar la reingeniería el diseño del producto debe ser fijo, si la tecnología base no evoluciona radicalmente permite que haya mercado para los productos restaurados, lo cual se presenta como una paradoja frente al acelerado ritmo actual de cambio tecnológico. • Es más viable para proveedores de servicios, ya que se espera sacarle el máximo provecho al uso de los objetos.
Reuso	<ul style="list-style-type: none"> • Es la redistribución del producto a un sector de consumidores que estén dispuestos a aceptarlo en su estado de uso, con los siguientes posibles propósitos: <ol style="list-style-type: none"> 1. Usarlo para su objetivo original (p. ej. automóvil de segunda mano). 2. Adaptarlo a otro uso (p. ej. Llantas reutilizadas para juegos infantiles). • No involucra procesos de transformación de los materiales como en el caso de reciclaje. • Se requiere de canales adecuados de comunicación y de comercialización o donación, para que la gente que no necesita los productos aún los pueda vender u otorgárselos a aquellos que quieran utilizarlos.
Compostaje	<ul style="list-style-type: none"> • El proceso más común para biodegradar materiales es el compostaje, en el cual se crea un medio óptimo (temperatura y humedad, etc.) para que ocurran los procesos de descomposición de los residuos orgánicos. • La composta o compost, es el producto que se obtiene del compostaje y representa un "grado medio" de descomposición de la materia orgánica, un grado completo sería el humus, en ambos casos se obtiene un fertilizante natural de alta calidad. • El tiempo que tarda en biodegradarse el biocompuesto PLA/FAT en una composta depende de distintos factores, como las características de la pieza (tamaño, densidad, concentración de fibra, etc.), tipo de composta, etc.

Fuente: Elaboración a partir de la información consultada y complementada de (Materials and the Environment; Eco-Informed Material Choice, 2009, págs. 67-70).

Recomendaciones

- Se considera como prioridad la responsabilidad del fabricante con los residuos que producen sus productos, de forma que tiene que fomentarse una relación entre la persona que usa el producto, y la parte (empresa) que produce el producto, como ocurre con una póliza de garantía, pero en este caso se requeriría la respuesta de la empresa al terminar la vida del producto. Esta responsabilidad contempla desde comunicar la información necesaria a las personas para la correcta disposición final del material, hasta la recuperación de residuos con el fin de reciclarlos o procesarlos por medio de compostaje.
- La correcta identificación del material por medio de iconografía que indique el tipo de biopolímero, así como el grado de PLA/FAT utilizado permitirá que la recolección y separación de residuos se facilite.
- Se recomienda la elaboración de pruebas mecánicas y térmicas con el material biocompuesto PLA/FAT reciclado, para caracterizar los cambios en las propiedades en función del número de veces que se recicla el material.
- La elaboración de pruebas de biodegradación por compostaje son esenciales para complementar la caracterización del material y determinar con mayor certeza la forma en que distintas variables afectan la degradación, como el contenido de fibra, el tipo de composta, el tamaño de los residuos del biocompuestos, así como otras variables.
- El reciclado de desechos de PLA, como empaques y otros objetos desechables, pueden servir como una fuente de materia prima de bajo costo para la producción del biocompuesto PLA/FAT. La logística de recolección de residuos presenta retos importantes, como la falta de simbología de identificación para los biopolímeros que se utilizan, lo cual podría contaminar el proceso de reciclado. El acceso a los residuos se presenta como una limitante debido a los grupos que controlan la recolección, separación y reciclado de residuos.
- No queda descartada la opción de incineración del biocompuesto PLA/FAT para la recuperación de energía, es necesario determinar y comparar la cantidad de emisiones producidas contra la eficiencia energética obtenida para justificar el impacto ambiental que se produce.

CONCLUSIONES

El desarrollo de nuevos materiales presenta un futuro prometedor para lograr la construcción de nuestro ambiente artificial mediante un enfoque hacia el desarrollo sustentable. La problemática detrás de la materialización masiva de las sociedades *superindustrializadas* y los impactos ambientales que esto ha generado con el paso del tiempo, nos impulsa a cuestionar la necesidad de seguir creando materiales, sin embargo es innegable que la demanda de estos aumenta a la par del crecimiento de los asentamientos humanos. Nuestra realidad material debe ser modificada con alternativas diseñadas para causar el menor impacto ambiental posible durante su ciclo de vida y los mayores beneficios para aquellos involucrados en el proceso.

Existen líneas de investigación acerca de la experimentación con materiales biocompuestos hechos a partir de recursos renovables, así como la mezcla con recursos no renovables, en los cuales se aprovechan distintos tipos de fibras naturales para actuar como agente de refuerzo. Esto demuestra un interés por desarrollar este tipo de materiales, siendo uno de los principales objetivos aprovechar recursos renovables para disminuir los impactos ambientales durante el ciclo de vida de los mismos. El desarrollo de biopolímeros ha recibido mucha atención para la elaboración de biocompuestos al ser sustancias que aportan una alternativa a los polímeros petroquímicos, con la ventaja de provenir de recursos renovables y con propiedades que demuestran tener un buen desempeño en distintas aplicaciones. Al emprender la búsqueda por sustancias que pudieran actuar como matriz en un biocompuesto biodegradable, destacó la disponibilidad de los biopolímeros de poliácido láctico, siendo un factor clave para experimentar con este material para elaborar un material biocompuesto reforzado con fibras naturales.

La etapa de experimentación comprobó que es posible la fabricación de un material biocompuesto biodegradable conformado por; una matriz a partir de poliácido láctico (PLA), y como agente de refuerzo fibras de bagazo de *Agave tequilana* Weber (FAT). A partir de la experimentación y el análisis de este material, se exponen los cambios en las propiedades del mismo al variar el contenido de fibra, lo cual aporta conocimientos valiosos para describir las características del biocompuesto PLA/FAT. En los siguientes puntos se destacan las principales conclusiones a partir del análisis de las muestras elaboradas a nivel laboratorio:

- La resistencia a la tensión del biocompuesto disminuye hasta un 24.7% al aumentar el contenido de fibra, lo cual se refleja en un material más rígido y quebradizo. Este comportamiento se logró contrarrestar con el uso de un menor tamaño de fibra en la mezcla.
- La resistencia a la flexión presenta el mismo comportamiento, ya que disminuye hasta un 48.4% conforme se aumenta el contenido de fibra.
- La resistencia al impacto del biocompuesto aumenta 52.5% al añadir un contenido de fibra de agave del 40%, lo cual presenta una cualidad que puede permitir que se utilice el PLA en aplicaciones que antes no se contemplaba por la falta de esta cualidad.
- El aumento en el contenido de fibra en el biocompuesto representa un incremento en el porcentaje de absorción de agua del mismo debido al contenido de celulosa que aporta la fibra, se registró un 18.62% de aumento de peso en una muestra con un contenido de fibra del 40%, después de 5 semanas de inmersión en agua.
- El aumento en el contenido de fibra en el biocompuesto PLA/FAT también influye en una mayor decoloración y deformación después de exponer el material a la luz solar y los cambios de temperatura y humedad de la intemperie.

A partir de los resultados obtenidos en la elaboración de pruebas para evaluar las propiedades del material, podemos determinar que el biocompuesto PLA/FAT tiene potencial para aplicarse en ambientes interiores. Los biopolímeros se han utilizado principalmente para la elaboración de empaques y productos desechables con un tiempo de vida corto, los materiales biocompuestos obtenidos tienen características que demuestran que es posible la exploración de nuevas aplicaciones con un mayor tiempo de vida.

La idea de la desmaterialización del diseño se presenta como un enfoque interesante para crear una conciencia en relación a la forma en que consumimos los recursos naturales que procesamos y utilizamos para materializar productos casi de manera compulsiva. Desde el inicio de esta investigación se adoptó esta noción como una guía para encaminar el desarrollo del material, lo cual se traduce en tres acciones principales que parten de la desmaterialización como parte del diseño de un ciclo de vida en constante retroalimentación:

- En primera instancia al inicio del ciclo en la etapa de extracción el aprovechamiento de residuos forma parte de la materia prima, de manera directa con el uso del bagazo de agave (residuo agroindustrial) y de forma indirecta con las empresas que pretenden usar residuos agrícolas para la elaboración de políácido láctico y el biopolímero PLA.
- La segunda acción es la reducción de residuos sólidos en la etapa de disposición final del biocompuesto PLA/FAT, ya que al poder biodegradarse mediante compostaje se produce compost o humus para fertilizar cultivos, como los de maíz y agave, que son los dos recursos principales en la etapa de extracción.
- La tercera acción es el reciclaje del biocompuesto, tanto de los residuos preconsumo como postconsumo, con la opción de conformar el mismo producto o uno diferente, lo cual implica la reducción de materia prima virgen.

La desmaterialización no se interpreta de manera literal, sino que implica buscar una mayor eficiencia en el consumo de recursos, así como enfatizar una noción cíclica de la vida de los materiales y productos que utilizamos. Aun cuando se fomente una conciencia por el cambio hacia el uso de servicios en lugar de la adquisición de bienes materiales, siempre serán necesarios recursos materiales para construir una infraestructura y fabricar productos que se utilizan para soportar la *inmaterialidad* que suponen dichos servicios. La interpretación de la idea de desmaterialización también se considera como un agente de cambio individual; de consumidores como parte de un sistema de producción y consumo masivos, a personas que cuestionan lo que consumen, y forman criterios para modificar su calidad de vida, dentro de un sistema que busca responder a la demanda masiva de recursos sin comprometer el medio ambiente que provee los recursos que necesitarán las generaciones más jóvenes.

En la actualidad la demanda y la producción de biopolímeros va en aumento, se ha creado mucha expectativa acerca de los beneficios que nos pueden aportar estos materiales, sus propiedades y la cualidad de biodegradarse de algunos tipos. Sin embargo no podemos dar por sentado que la sustitución de los biopolímeros por los polímeros petroquímicos resolverá el problema de la acumulación de residuos y los distintos impactos ambientales que implica la producción de los plásticos actualmente. Se deben cuestionar los aspectos que pueden representar impactos ambientales considerables, anteriormente se mencionó acerca del uso de tierra para la siembra de plantas requeridas para la producción de bioplásticos, a partir de la información consultada se puede considerar que la producción de biopolímeros en un futuro no comprometerá el espacio de cultivo destinado para satisfacer necesidades alimenticias. Pero esto representa sólo una interpretación de datos, en la realidad los escenarios de aumento de la producción de biopolímeros y los requerimientos de materia prima pueden ser variables, por lo que no se pretende asumir que esta resulta esta problemática. Es esencial el cuestionamiento de los beneficios que prometen los plásticos biodegradables, el análisis de ciclo de vida de sus diferentes aplicaciones puede aportar información valiosa para determinar la ecoeficiencia de los mismos.

La representación del ciclo de vida para el biocompuesto PLA/FAT nos permite apreciarlo como un sistema complejo, en el que cualquier acción en alguna de sus partes afecta al desempeño general del mismo. El Diseño de Ciclo de Vida se presenta como una importante guía para diseñar estrategias con el objetivo de disminuir los impactos ambientales durante el ciclo de un producto, las etapas mencionadas no pretenden ser un mecanismo de disección de este sistema, sino hacer énfasis en la importancia de la interacción entre las partes del mismo. La conciencia acerca de la complejidad de este y cualquier ciclo de vida es un punto de aprendizaje esencial en esta investigación, ya que no podemos actuar como entes independientes a lo que ocurre en otros campos del conocimiento. En la realidad nos encontramos en una constante interacción con personas, servicios y objetos, los cuales dependen del trabajo de muchos, la resolución de problemas debe contemplar esta naturaleza compleja; la cual demanda la integración de distintos conocimientos para lograr formular propuestas que respondan a problemáticas determinadas. La

investigación multidisciplinaria es fundamental para adoptar una perspectiva más amplia acerca de cómo podemos diseñar nuestro ambiente artificial a partir de los objetivos para lograr un desarrollo sustentable como guía para enfocar nuestro trabajo.

Retos para el futuro

El conocimiento construido en el transcurso de esta investigación nos permite detectar distintos retos para la elaboración de materiales biocompuestos reforzados con fibras naturales en el futuro y

- El desarrollo de biopolímeros en México es necesario para disminuir los impactos ambientales implicados con la importación de la materia prima para la elaboración de un material biocompuesto. No debe pasar desapercibido, que por ejemplo en países como Brasil, el fomento a la producción de bioetanol ha causado parte importante de la deforestación de miles de kilómetros cuadrados de la selva del Amazonas para sembrar caña de azúcar, así como otros productos agrícolas (Martino, 2007, págs. 14,15). La producción de biopolímeros implica el uso de tierras de cultivo para plantar maíz u otro recurso para producir biopolímeros. Es crucial la correcta regulación de la asignación de extensiones de tierra para la siembra de recursos agrícolas que no están destinados a la alimentación, por ningún motivo se debe amenazarlas áreas protegidas, ni las tierras que se utilizarán para responder a la creciente demanda alimenticia. Esto no está lejos de ser una realidad en México, ya que hay disponibles vastos recursos naturales que podrían generar interés nacional e internacional para responder a esta demanda.
- El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) del biocompuesto PLA/FAT se presenta como uno de los requerimientos principales para poder determinar con mayor verosimilitud los impactos ambientales que se producen durante el ciclo de vida del material.
- El impacto al pilar social y cultural se ha omitido durante mucho tiempo de la metodología del ACV, así como otras que buscan el diseño ecológico, lo cual establece límites que debemos superar aprovechando el conocimiento generado en otros campos de estudio y fomentando la colaboración en equipos multidisciplinarios para responder de forma más holística a los problemas que enfrentamos. Se considera una prioridad el fomento a la investigación para integrar el impacto social y cultural en las metodologías existentes de ACV para complementar el análisis de los impactos producidos durante el ciclo de vida, y entonces poder interpretar con más precisión y objetividad el desempeño ambiental de los productos y servicios que diseñamos y utilizamos.
- Es necesario fomentar un cambio en los hábitos de consumo y desecho que adquirimos al formar parte de las dinámicas del sistema de producción y consumo; tenemos que madurar una consciencia acerca de las afectaciones, tanto a nivel individual como social, detrás de la relación con los objetos que adquirimos y que conforman parte del ambiente artificial en el que vivimos y nos desarrollamos. Es un tema de suma importancia que estudian distintos campos de estudio y que representa un factor clave para promover un cambio hacia un sistema de producción y consumo sustentable.
- El costo del biopolímero PLA ha disminuido con el paso del tiempo, pero sigue siendo elevado en comparación con otros polímeros termoplásticos. La fibra de bagazo de agave como agente de refuerzo ayuda a disminuir el costo del material, lo cual indica que el desarrollo de materiales con un mayor contenido de fibra representa una ventaja importante, que a su vez necesariamente implica repercusiones en las propiedades del material biocompuesto que pueden limitar sus aplicaciones.

- La tecnología especializada para procesar mezclas de polímeros con cargas orgánicas es esencial para mejorar la calidad del biocompuesto PLA/FAT. Es necesario determinar la configuración óptima de la línea de producción y sus variantes acorde al tipo de material y producto que se quiera elaborar. En este sentido hace falta explorar la posibilidad de procesamiento mediante otros métodos de producción.
- La introducción de los materiales biocompuestos reforzados con fibras naturales al sistema de producción y consumo, presenta distintos requisitos como: el precio, calidad, cantidad, efectividad, etc.; la realidad exige que un producto cumpla con todos para competir el mercado, lo cual expone distintos cuestionamientos que deben ser respondidos con el fomento al desarrollo de este tipo de materiales.
- El aprovechamiento de otros residuos agrícolas y agroindustriales como materia prima para fabricar materiales es un factor clave que forma parte del objetivo por hacer más ecoeficiente el consumo de recursos naturales. Estos materiales de bajo costo y producción masiva se encuentran desaprovechados y tienen potencial para conformar distintos tipos de ecomateriales. Se destaca el argumento de que: cualquier residuo producido tiene potencial para reutilizarse o reciclarse nuevamente dentro de un ciclo productivo, hasta que se demuestre lo contrario y entonces se utilice el método más adecuado para su disposición final.

GLOSARIO

Análisis del Ciclo de Vida (ACV). Es definido como *un proceso objetivo para evaluar los problemas ambientales asociados con un producto, proceso o actividad al identificar la energía y materiales utilizados y los desperdicios liberados al ambiente, y evaluando e implementando la oportunidades para lograr mejoras medioambientales.* (Society of Environmental Toxicology and Chemistry, SETAC, Code of Practice, 1991).

Agente de refuerzo. Es una de las fases que compone un material compuesto, la cual que absorbe esfuerzo transmitidos por la matriz. La microestructura del agente reforzante incluye la forma, tamaño, distribución y orientación de las partículas (Blank y Castelló, 2002).

Ambiente artificial. Lo podemos definir como una *“forma contemporánea de leer lo artificial, como un sistema de artefactos materiales e inmateriales, en relación y en competencia al mismo tiempo en un ambiente limitado”* (Manzini, 1994, pág. 91). El ambiente artificial es el medio por el cual nos hemos adaptado al entorno, en el cual llevamos a cabo la inmensa variedad de actividades para sustentar las sociedades.

Artefacto. Genéricamente hablando, el artificio es el resultado de la *techne*, del hacer con arte, el artefacto es su producto concreto. En la actualidad esto se refleja en una variedad inmensa de objetos, máquinas, etc. (Maldonado, 1998).

Bagazo. Residuo fibroso que se da como desecho después de la molienda del agave una vez que se le ha extraído el jugo (Academia Mexicana del Tequila A.C., 2012).

Biodegradación. Es un proceso natural por el cual químicos orgánicos en el medio ambiente con convertidos en compuestos más simples, mineralizados y redistribuidos a través de los ciclos elementales como el del carbono, nitrógeno y sulfuro. La biodegradación puede ocurrir solamente dentro de la biosfera, ya que los microorganismos juegan un rol central en el proceso de biodegradación.

Biopolímero. Los polímeros derivados de recursos naturales se les pueden denominar como biopolímeros. La biodegradabilidad caracteriza a los biopolímeros, pero esta depende de diferentes factores que varían de acuerdo al tipo de recurso.

Cabeza, piña o bola. Es la parte que se cosecha del agave y es aprovechada para la producción de tequila. Contiene los azúcares polisacáridos que mediante el procesamiento industrial se destilan en tequila; está formada por la base de las hojas y el tallo o mezonte (Valenzuela Zapata, El Agave Tequilero Cultivo e Industria en México, 2003).

Cultura Material. Es el conjunto de todos los artefactos que una sociedad ha creado (Maldonado, 1998).

Compostaje. Es el proceso más común para biodegradar materiales, en el cual se crea un medio óptimo (temperatura, humedad, acidez, etc.) para que ocurran los procesos de descomposición de los residuos orgánicos. La composta o compost, es el producto que se obtiene del compostaje y representa un “grado medio” de descomposición de la materia orgánica. Se denomina humus al “grado superior” de descomposición.

Desmaterialización. Se refiere a la transición de la extracción y consumo masivo de recurso para materializar el ambiente artificial en el que vivimos hacia una conciencia por hacer más eficiente este consumo, así como la reducción de materiales utilizados para fabricar un productos que sean implementados como parte de servicios que fomenten actitudes de consumo hacia la renta y no la adquisición de bienes materiales.

Esfuerzo: La intensidad de una fuerza distribuida en forma continua, que actúa sobre toda la sección transversal de una barra (muestra) se llama esfuerzo y se denota con la letra σ (sigma). Por lo tanto la fuerza axial P que actúa en la sección transversal es la resultante de esfuerzos distribuidos en forma continua. Para obtener la magnitud del esfuerzo se divide la fuerza axial entre el área transversal, representado en la siguiente expresión:

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

Debido a que los esfuerzos actúan en una dirección perpendicular al área de la sección transversal, se les llama esfuerzos normales (M. Gere y P. Timoshenko, 1997, pág. 4).

Ecoeficiencia. *Ecoeficiencia es un concepto que pretende servir de base para toda estrategia empresarial que pretenda ser compatible con los de la sociedad sustentable. Por un lado está la eficiencia productiva implícita en toda actividad empresarial y, por otro, la consideración de los impactos ambientales por el desarrollo de dicha actividad. El objetivo de la ecoeficiencia es intentar ofrecer a una mayoría de consumidores, bienes y servicios cuyo costo, a escala ecológica significativamente menor, sea abordable económicamente* (Viñolas, 2005, pág. 152).

Ecología. Ciencia que estudia las relaciones de los seres vivos entre sí y con su entorno. El concepto de ecosistema se deriva del término ecología, creado por el biólogo alemán Ernst Heinrich Haeckel (1834 – 1919) en 1866. Denota los estudios científicos de los ecosistemas y las relaciones entre los organismos y todos los aspectos de su ambiente, tanto vivos como no vivos. El término ecología también se relaciona con los efectos que los organismos tienen en un ambiente inanimado.

Ecológico. Relativo a lo ecológico, contempla las relaciones entre los seres vivos respetando los límites de la naturaleza.

Ecosistema. El término ecosistema fue utilizado por primera vez en 1935, por el botánico inglés Arthur George Tansley (1871 – 1955) y después desarrollado como un sistema general por Eugene P. Odum (1913 – 2002), un ecosistema es definido como “*una unidad discreta en la naturaleza, que consiste de partes vivas y no vivas, juntas en la totalidad de su ambiente, interactuando para conformar un sistema estable*” (Yeang, Ecodesign: a manual for ecological design, 2008).

Extrusión. Proceso mediante el cual se eleva la temperatura de un polímero termoplástico para forzarlo por medio de un husillo a través de un dado para adquirir una forma determinada.

Formaldehído. El formaldehído es un compuesto que se encuentra en la naturaleza, es denominado un compuesto orgánico volátil (VOC), las altas emisiones por la actividad humana se consideran un contribuyente a la destrucción de la capa de ozono y la formación de smog. Productos como lacas, selladores, pinturas, etc. que sirven para dar acabado, también son emisores de formaldehído.

Huella Ecológica. La huella ecológica mide la cantidad de tierra productiva necesaria para soportar el consumo y residuos de una nación.

Medio. Se define como el *conjunto de factores que influyen sobre los organismos humanos, animales y vegetales, de esta manera nos referimos a un ambiente global dentro de una dinámica integrada e integradora la de la vida* (Viñolas, 2005).

Material biocompuesto. Son materiales compuestos completa, o parcialmente, de elementos que provienen de recursos naturales renovables.

Material compuesto. Es un sistema integrado por una mezcla o combinación de dos o más micro o macroconstituyentes que difieren en forma y composición química, y que son esencialmente

insolubles entre sí. La mayor parte de los materiales compuestos están formados por dos o más fases, una matriz continua que rodea a las demás fases, que se denominan agentes reforzantes o fases dispersas y que se clasifican en función de su microestructura o geometría.

Mercado. En relación al conjunto de actividades realizadas libremente por los agentes económicos. También nos referimos al conjunto de operaciones comerciales que afectan a un determinado sector de bienes, de los cuales se genera una oferta y demanda (Real Academia Española, 2013).

Materia prima. *La que una industria o fabricación necesita para sus labores, aunque provenga, como sucede frecuentemente, de otras operaciones industriales. (Real Academia de la Lengua).*

Matriz. La matriz es responsable de las características físicas y químicas, transmitiendo los esfuerzos al agente reforzante y también protegiendo y dando cohesión al material.

Moldeo por compresión. Método de producción para moldear un material mediante la aplicación de calor y presión a un molde que contiene la materia.

Penca. Se denomina de esta manera a la hoja del agave.

Pentosán. Cualquier grupo de polisacáridos encontrados en la celulosa de muchas plantas fibrosas.

Plástico. Un material sintético hecho a partir de un amplio rango de polímeros orgánicos. Pueden ser moldeados para adquirir una forma.

Polímero. *Compuesto químico, natural o sintético, formado por polimerización y que consiste esencialmente en unidades estructurales repetidas. (Real Academia de la Lengua, 2013).*

Sustentabilidad. Es la capacidad de *satisfacer las necesidades de las generaciones presentes, sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras de satisfacer las suyas* (Naciones Unidas, 1987). Los cuatro pilares para lograr un desarrollo sustentable son la sociedad, la cultura, la economía y el ambiente.

REFERENCIAS

- Agave para la producción de biocombustibles*. (28 de Julio de 2011). Obtenido de <http://ocioseando.net/2011/07/28/el-agave-podria-ser-una-planta-ideal-para-generar-biocombustible/>
- Alvarez de la Puente, J. (2008). *Manual de Compostaje para Agricultura Ecológica*. Andalucía, España.
- Ashby, M. F. (2009). *Materials and the Environment; Eco-Informed Material Choice*. Butterworth-Heinemann.
- Asian Productivity Organization. (2012). *APO ECO-PRODUCTS DATABASE*. Obtenido de Eco-products Directory 2012: <http://apo-ecoproducts.com/first/index.html>
- Balam Cocom, R. J., Duarte, A. S., y Canché, E. G. (2006). Obtención y Caracterización de Materiales Compuestos de Fibras de la "pina" de Henequén y Polipropileno. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 5.
- Bautista Justo, M., Barboza Corona, J. E., y Parra Negrete, L. A. (2001). *El Agave Tequilana Weber y la Producción de Tequila*. Guanajuato.
- Belmares, H. (s.f.). *El Uso de Fibras Duras como Material de Construcción. Estado de Avance*. Centro de Investigación de Química Aplicada (CIQA), Saltillo.
- Birkeland, J. (2002). *Design for Sustainability A Sourcebook of Integrated Eco-logical Solutions*. Londres: Earthscan Publication Ltd.
- Blank, M. S., y Castelló, W. B. (2002). *Materiales Compuestos Fibrosos*.
- Brezet, H., y Van Hemel, C. (1997). *EcoDesign: A Promising Approach to Sustainable Production and Consumption*. Delft: United Nations Publication.
- Brownell, B. (2012). *Transmaterial*. Obtenido de sitio web de Transmaterial: <http://transmaterial.net/>
- Canché Escamilla, G. (2010). *Obtención de Celulosa y Materiales Compuestos a partir de los Residuos Generados de la Explotación de las Agaváceas*. Centro de Investigación Científica de Yucatán, Mérida.
- Canché Escamilla, G., Duarte Aranda, S., y Echeverría Arjonilla, L. (2012). Obtención y Caracterización de Materiales Compuestos de Fibras de Bagazo de agave Tequilana y políacido láctico (PLA). *Congreso Nacional de la Sociedad Polimérica de México*, (pág. 6). Mérida.
- Caroline, B. (2004). *Green composites: Polymer composites and the environment*. Nueva York: CRC Press.
- Carpintero, O. (2005). *El metabolismo de la economía española: Recursos naturales y huella ecológica (1955-2000)*. Lanzarote: Fundación César Manrique.
- Carrillo Ceseña, N. (1975). *La Industria de Tableros Aglomerados de Bagazo de Caña*. Tesis (licenciado en economía, UNAM, Facultad de Economía, México).
- Centro Empresarial del Plástico. (Marzo-Abril de 2013). Bioplásticos El verde no es como lo pintan. (M. P. Ortiz, Ed.) *Ambiente Plástico*(56), 38-64.
- Cervantes Torre-Marín, G., Sosa Granados, R., Rodríguez Herrera, G., y Robles Martínez, F. (2009). *Ecología industrial y desarrollo sustentable*. Mérida.
- Chávez Aguilera, C. (2010). *Conceptos Básicos para el Conocimiento de los Materiales en el Diseño Industrial*. Tesis para obtener el grado de Maestro en Diseño Industrial, Universidad Nacional Autónoma de México, Posgrado en Diseño Industrial, México.

- Chejne Janna, F. (26 de Abril de 2012). *e-URE*. (F. C. Janna, Productor) Obtenido de Conceptos Básicos de Termodinámica: <http://www.si3ea.gov.co/Eure/1/inicio.html>
- Congreso General de los Estados Unidos Mexicanos. (2012). *Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos*. México.
- Consejo Regulador del Tequila. (10 de Mayo de 2012). *Consejo Regulador del Tequila*. Recuperado el 23 de Abril de 2011, de <http://www.crt.org.mx/>
- Crul, M., y Diehl, J. (2007). *Design for Sustainability*. Obtenido de <http://www.d4s-de.org/>
- Delft University of Technology, D. M. (2009). *Design for Sustainability a Global Guide Modules*.
- Faruk, O., Bledzki, A. K., Fink, H.-P., y Sain, M. (2012). Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000-2010. *Progress in Polymer Science*, 1552-1596.
- Fernández Rodríguez, N. (2000). El Bagazo y las Fibras Anuales: Presente y Futuro para su Industrialización. *Congreso Iberoamericano de Investigación en Celulosa y Papel CIADICYP*, (pág. 13). La Habana.
- Fisher-Kowalski, M. (1999). Society's Metabolism. The intellectual history of Materials Flow Analysis, Part II, 1970-1998. *Journal of Industrial Ecology*, 2(4), 107-136.
- Food Biopack Project. (2000). *Biobased Packaging Materials for the Food Industry. Status and Perspectives*. Frederiksberg.
- García Parra, B. (2008). *Ecodiseño nueva herramienta para la sustentabilidad*. México: Designio.
- Garrette, C., Kosoris, J., Nguyen Hong, L., y Marcel, C. (2009). *Design for Sustainability: Current Trends in Sustainable Product Design and Development*. Recuperado el 10 de Abril de 2011, de www.mdpi.com/journal/sustainability: www.mdpi.com/2071-1050/1/3/409/pdf
- Gere, J. M., y Timoshenko, S. P. (1997). *Mecánica de Materiales*. Boston: International Thomson Editores.
- Goedkoop, M., van Halen, C., te Riele, H., y Rommens, P. (1999). *Product Service Systems, Ecological an Economic Basis*. PricewaterhouseCoopers N.V., Storm C.S., PRé consultants, The Netherlands.
- Goergescu-Roegen, N. (Marzo de 1977). ¿Qué puede enseñar a los economistas la termodinámica y la biología? V. Nueva York: Atlantic Economic Journal.
- González García, Y., González Reynoso, O., y Nungaray Arellano, J. (2005). Potencial del Bagazo de Agave Tequilero para la Producción de Biopolímeros y Carbohidrasas por Bacterias Celulíticas y para la Obtención de Compuestos Fenólicos. *e-Gnosis Revista Digital Científica y Tecnológica*. (T. M. Jiménez, Ed.) Guadalajara, Jalisco, México: Universidad de Guadalajara, Coordinación General de Sistemas de Información.
- González Martínez, A. C. (2007). La extracción y consumo de biomasa en México (1970-2003): integrando la leña en la contabilidad de flujos materiales. *Red Iberoamericana de Economía Ecológica*, 6: 1-16.
- Graedel, E. T., y Allenby, B. R. (1996). *Design for Environment*. New Jersey: Prentice hall.
- Grupo de Investigación den Gestión Ambiental, Escuela Superior de Comercio Internacional y Universidad Pompeu Fabra ESCI, UPF. (2009). *Ecojoguina: Diseño Ecológico de Juguetes*. Barcelona.
- Hernandez de Anda, A. (1977). *Aportación al Estudio del Análisis de los Procesos en la fabricación de Tableros Algomerados y Posible Utilización de los Residuos Agrícolas de México*. Tesis de licenciatura en ingeniería química, UNAM, México.
- Hidayat, A., y Tachibana, S. (2012). Characterization of polylactic acid (PLA)/kenaf composite degradation by immobilized mycelia of *Pleurotus ostreatus*. *Intenational Biodeterioration y Biodegradation*(71), 50-54.

- Iglesias Álvarez, P. H., y Luna Antonio, R. (2009). "LA BIOMASA" Otra forma sustentable de energía en México. Universidad Tecnológica del Sureste de Veracruz, Nanchital de Lázaro Cárdenas del Río.
- Ikada, Y., y Tsuji, H. (1999). Biodegradable polyesters for medical and ecological applications. *Macromolecular Rapid Communications*, 117-132. Susuka, Japón.
- Instron. (22 de 1 de 2012). *Glosario de términos para pruebas a materiales*. Obtenido de sitio de la empresa Instron: <http://www.instron.com.ar/wa/glossary/default.aspx>
- Iñiguez, G., Acosta, N., y Martínez, L. (2005). Utilización de Subproductos de la Industria Tequilera. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 21, 37-50. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Jacinto Ambrocio, J. C. (2007). *Concretos Durables con Alto Consumo de Ceniza Volante para Vivienda de Interés Social*. Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Jandas, P. J., Mohanty, S., Nayak, S. K., y Srivastava, H. (Noviembre de 2011). Effect of Surface Treatments of Banana Fiber on Mechanical, Thermal, and Biodegradability Properties of PLA/Banana Fiber Biocomposites. *Polymer Composites*, 32. Bhubaneswar, India: Wiley.
- K. Bledzki, A., Jaszkiwicz, A., y Scherzer, D. (2008). Mechanical properties of PLA composites with man-made cellulose and abaca fibres. *Composites: part A*, 404-412.
- Kadolph, S. J. (2007). *Textiles tenth edition*. New Jersey: Prentice Hall.
- Kapp, W. (1976). *El carácter de sistema abierto de la economía y sus implicaciones*. Londres: Kurt Dopfer.
- Kingston University. (1994). *Rematerialise eco smart materiales*. Obtenido de The Sustainable Materials Library: <http://extranet.kingston.ac.uk/rematerialise/our-vision.htm>
- Le Duigou, A., Pillin, I., Bourmaud, A., Davies, P., y Christophe, B. (2008). Effect of recycling on mechanical behaviour of biocompostable flax/poly(L-lactide). *Composites: Part A*, 1471-1478.
- Lefteri, C. (2008). *Así se Hace Técnicas de Fabricación para Diseño de Producto*. Barcelona: Blume.
- Li, Z., Zhou, X., y Pei, C. (2011). Effect of Sisal Fiber Surface Treatment on Properties of Sisal Fiber Reinforced Polylactide Composites. *International Journal of Polymer Science*, 7. Shanghai, China.
- Lovins, A., Hawken, P., y Lovins, H. (1999). *Natural Capitalism. Creating the next industrial revolution*. Little, Brown and Company.
- M. Gere, J., y P. Timoshenko, S. (1997). *Mecánica de Materiales*. México: International Thomson Editores.
- Madge, P. (1997). Ecological Design: A New Critique. *Design Issues*, 13, 44-54. Boston: MIT Press.
- Madrigal, L., y Sangronis, E. (2007). La inulina y derivados como ingredientes claves en alimentos funcionales. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 57. Caracas, Venezuela.
- Maldonado, T. (1998). *Crítica a la razón informática*. Barcelona: Paidós.
- Manzini, E. (1992). *Artefactos Hacia una Nueva Ecología del ambiente Artificial*. 208.
- Manzini, E. (1994). *Design, Environment and Social Quality*. *Desing Issues*, 208. Boston: MIT Press.
- Manzini, E., y Vezzoli, C. (2008). *Design for Environmental Sustainability*. Milán: Springer.
- Martínez, A. (Octubre de 2011). *Sistema de Información Estadística y Geográfica de Jalisco*. Recuperado el 22 de Febrero de 2012, de SIEG: <http://sieg.gob.mx/contenido/GeografiaMedioAmbiente/VTARcolectoresRME.pdf>

- Martino, D. (Febrero de 2007). Deforestación en la Amazonía principales factores de presión y perspectivas. *Revista del Sur*. Montevideo, Uruguay.
- Masera R., O. (2005). *Estimación de los Recursos y Prospectiva Tecnológica de la Biomasa como Energético Renovable en México*. UNAM, México.
- McDonough, W., y Braungart, M. (2002). *Cradle to Cradle: remaking the way we make things*. Nueva York: Douglas y McIntyre Ltd.
- Moggridge, B. (2007). Designing Interactions. *Design Issues*, 656. Boston: MIT Press.
- Mohanty, A. K., Misra, M., y Drzal, L. T. (2005). *Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites*. Florida: Taylor y Francis.
- Moles, A. (1988). Design and Immateriality: What of it in a Post-Industrial Society. *Design Issues*, 4, 30.
- Mont, O. (2002). Clarifying the Concept of Product-Service System. *Journal of Cleaner Production*, 237-245. Lund, Suecia: Elsevier.
- Moret, O. (1990). *Contribución al Estudio de los Efectos Tóxicos del Formaldehído*. Universidad de los Andes, Mérida.
- Mori, H., Hotta, Y., y Hashi, T. (2012). *3R Initiative*. Obtenido de United Nations Economic and Social Comision for Asia and de Pacific: http://www.unescap.org/esd/environment/mced/tggap/documents/RPD/8_MoriSan_3RInitiative.pdf
- Morin, E., y Hulot, N. (2008). *El Año I de la Era Ecológica*. Madrid: Paidós.
- Mortimer, Evans, y Hampton. (2009). NNFCC The Bioeconomy Consultants. *Environmental Impact of Renewable Materials: Final Report*. York, Inglaterra. Retrieved from Environmental Impact Renewable Materials: Final Report: <http://www.nnfcc.co.uk/tools/environmental-impact-of-renewable-materials-final-report-nnfcc-09-019>
- Mott, P.E., R. L. (1996). *Resistencia de Materiales Aplicada*. México: Prentice Hall.
- Müller, R. -J. (2005). Biodegradability of Polymers: Regulations and Methods for Testing. *Biopolymers Online*, 365-374.
- Muzzy, J. D. (6 de Abril de 2000). Thermoplastics - Properties. Atlanta, Georgia, Estados Unidos: Georgia Institute of Technology. Recuperado el 2013.
- Núñez, C. E. (2008). Sitio Personal de Carlos Eduardo Núñez. Recuperado el 21 de Marzo de 2011, de <http://www.cenunez.com.ar/archivos/55Enrelacinalostamicenormalizados.pdf>
- Ochi, S. (2008). Mechanical properties of kenaf fibers and kenaf/PLA composites. *Mechanics of Materials*, 446-452. Natori, Japón: Elsevier.
- Oksman, K., Skrifvars, M., y Selin, J.-F. (9 de Julio de 2003). Natural Fibres as reinforcement in polylactic acid (PLA) Composites. *Composites Science and Technology*. Trondheim, Noruega: Elsevier.
- Organization for Economic Cooperation and Development. (2006). *Decoupling the Environmental Impacts of Transport from Economic Growth*. París: OECD Publishing.
- Papanek, V. (1972). *Design for the Real World: Human Ecology and Social Change*. Nueva York: Random House.
- Pickering, K. (2008). *Properties and performance of natural fibre composites*. Cambridge: CRC Press.
- Piña Barba, M. C. (28 de Febrero de 2010). Los biomateriales y sus aplicaciones. *Casa del Tiempo*, 55-58. México: UAM.
- Plasticker. (2012). *Plasticker*. (R. Verhoeven, Ed.) Recuperado el 7 de 2 de 2013, de Plasticker the home of plastics: <http://plasticker.de>
- PNUMA. (2004). *¿Por qué adoptar un enfoque de ciclo de vida?* United Nations Environment Programme. Paris: Publicación de las Naciones Unidas.

- Polymer International. (1994). *Plastics from microbes: microbial synthesis of polymers and polymer precursors*. (D. P. Mobley, y C. Hanser Verlag, Edits.) 37(4), 322.
- PopTech. (2011). *PopTech Ecomateriales Innovation Lab*. Obtenido de http://poptech.org/ecomaterials_lab
- Raygoza, S., y Gastinel, J. (2008). Efecto de la Fibra de Agave de Desecho en el Reforzamiento de Polipropileno Virgen o Reciclado. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 8, 319-327. Guadalajara.
- Real Academia Española. (2013). *Diccionario de la Lengua Española - Vigésima segunda edición*. Recuperado el 8 de Abril de 2011, de <http://www.rae.es>
- Romero Riscalde, F. J. (2005). *Central Térmica de Biomasa de 5 Mw de Potencia*. UCLM, Escuela de Ingeniería Técnica Agrícola, Ciudad Real, Castilla-La Mancha.
- Sánchez Solís, A. (1981). *Desarrollo de Tableros Aglomerados a Base de Fibra de Henquén*. Tesis de licenciatura en Ingeniería Química, UNAM, Facultad de Química, México.
- Satyanarayana, K. G. (2009). Characterization of mexican blue agave bagasse and pita lignocellulosic fibers. *International Congress on Natural Fibers*.
- Secretaría de Información Agroalimentaria y Pesquera. (10 de Febrero de 2010). *Anuario Estadístico de la Producción Agrícola*. Obtenido de http://www.siap.gob.mx/aagricola_siap/icultivo/index.jsp
- Sectorial, D. G. (2008). *Producción de Tequila en México*.
- Sellers Jr., T. (2001). *Wood Adhesive Innovation and Applications in North America*. Madison, Wisconsin: Forest Products Journal.
- SEMARNAT. (2009). *El Medio Ambiente en México 2009: en Resumen*. México.
- Sepulveda, S. G. (2001). *Desarrollo Sostenible Microregional*. San José, Costa Rica: IICA, UNA, CDT.
- Sithique, M. R., y S., A. M. (2008). Mechanical an Morphological Behavior of Bismaleimide-Modified Soy based Epoxy Matrices. *International Journal Polymeric Materials*, 480-493.
- Stanton, W., Etzel, M., y Walker, B. (2004). *Fundamentos de Marketing*. Mc Graw Hill.
- T.H. Vink, E., R. Rábago, K., A. Glassner, D., y R. Gruber, P. (2003). Applications of life cycle assessment to NatureWorks™ polylactide (PLA) production. *Polymer Degradation and Stability*, 403-419.
- Tao, Y., Yan, L., y Jie, R. (Agosto de 2009). Preparation and properties of short natural fiber reinforced. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. (Elsevier, Ed.) Shangai, Tongji, China.
- Tao, Y., Yan, L., y Jie, R. (2009). Preparation and properties of short natural fiber reinforced poly(lactic acid) composites. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 651-655.
- Thackara, J. (2005). *In the Bubble Designing in a Complex World*. Boston: MIT Press.
- Thorpe, A. (2007). *The designer's atlas of sustainability (Charting conceptual landscape through economy, ecology and culture)*. Washington: Island Press.
- Ticolau, A., Arvinthan, T., y Cardona, F. (2010). A review of current development in natural fiber composites for structural and infrastructure applications. *Southern Region Engineering Conference*, (págs. 1-5). Toowoomba, Australia.
- Umair, S. (2006). *Environmental Impacts of Fiber Composite Materials Study on Life Cycle Assessment of Materials used for*. Tesis de Maestría, Estocolmo.
- UNEP. (2009). *Vital Geo Graphics*. Nairobi: UNEP.
- Universidad Nacional de Luján Departamento de Ciencias Básicas. (2012). *Química Industrial*. Obtenido de <http://www.unlu.edu.ar/~qui10192/qi0020902.htm>

- Urbáez Méndez, C. L., Carballo Abreu, L., Arteaga Crespo, Y., y Márquez Montesino, F. (2005). *Biomasa: alternativa sustentable para la producción de Biogás*. Universidad Pinar del Río "Hermanos Saíz Montes de Oca" Facultad de Forestal y Agronomía, Química, Pinar del Río.
- Valenzuela Zapata, A. G. (2003). *El Agave Tequilero Cultivo e Industria en México*. Mexico: Mundi-Prensa.
- Valenzuela Zapata, A. G., y Gaytán, M.-S. (s.f.). *La Jornada en la ciencia*. Recuperado el 22 de Febrero de 2012, de Mayahuel la diosa pulquera: <http://ciencias.jornada.com.mx/investigacion/ciencias-quimicas-y-de-la-vida/investigacion/mayahuel-la-diosa-pulquera>
- Viñolas, J. (2005). *Diseño Ecológico*. Barcelona: Blume.
- Wu, C.-S. (2011). Preparation, Characterization, and Biodegradability of Renewable Resource-Based Composites from Recycled Polylactide Bioplastic and Sisal Fibers. *Journal of Applied Polymer Science*, 347-355. Taiwan.
- X.Cao, Mohamed, A., y S.H., G. (8 de Abril de 2003). DSC study of biodegradable poly(lactic acid) and poly(hydroxy ester ether) blends. *Thermochimica acta*, 115-127. Peoria, Illinois, Estados Unidos: Elsevier.
- Yeang, K. (2008). *Ecodesign: a manual for ecological design*. Chichester: J. Wiley.
- Yeang, K., y Woo, L. (2010). *Dictionary of Ecodesign*. New York: Routledge.
- Zamora, A. (s.f.). *Scientific Psychic*. Recuperado el 14 de 3 de 2010, de <http://www.scientificpsychic.com/fitness/carbohidratos2.html>
- Zhang, Q., Shi, L., Nie, J., Wang, H., y Yang, D. (2012). Study on Poly(lactic acid)/Natural Fibers Composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 8.

ANEXOS

Anexo 1. Compatibilidad entre Materiales

La compatibilidad entre los materiales utilizados en el diseño de un producto es muy importante ya que determina la facilidad para reciclar el objeto completo, o hacer necesario su desensamblaje. Para determinar las características de la disposición final del producto, es necesario saber acerca de la compatibilidad de algunos materiales que se reciclan con facilidad.

Plásticos

Los termoplásticos actualmente ofrecen las mejores posibilidades para su reciclaje. Ningún plástico termofijo se puede combinar con un termoplástico. La combinación de plásticos en un producto es algo frecuente, aunque sea en una pequeña porción, muchos componentes cuentan con pequeñas piezas de plástico.

- Buena compatibilidad con una gran variedad de mezclas.
- Compatibilidad limitada a pequeñas cantidades de componente mayoritario.
- Incompatible.

Tabla 47. Compatibilidad entre termoplásticos.

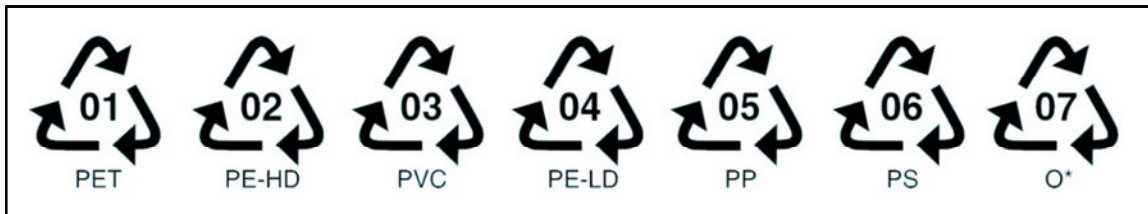
		Componente minoritario																	
		ABS	ASA	PA	PBT	PBT+PC	PC	PC+ABS	PC+PBT	PE	PET	PMMA	POM	PP	PPO	PPE+PS	PVC	SAN	TPU
Componente mayoritario	ABS	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	ASA	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	PA	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	PBT	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	PBT+PC	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	PC	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	PC+ABS	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	PC+PBT	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	PE	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	PET	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	PMMA	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	POM	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	PP	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	PPE	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	PPO+PS	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	PS	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	PVC	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	SAN	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	TPU	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

Fuente: (ECMA International)

Nomenclatura - ABS: Acrilonitrilo-butadieno-estireno, ASA: Acrilato de acrilonitrilo-estireno, PA: Poliamida, PBT: Polibutileno tereftalato, PC: Policarbonato, PE: Polietileno, PET: Polietileno tereftalato, PMMA: Polimetilo metacrilato, POM: Polióxido de metileno, PP: Polipropileno, PPO: Polióxido de propileno, PPE: Polifenilener, PS: Poliestireno, PVC: Policloruro de vinilo SAN: Copolímero de estireno-acrilonitrilo, TPU: Poliuretano termoplástico.

Una vez identificados los tipos de plástico de un producto es necesario marcarlos con la simbología adecuada para su fácil reconocimiento después de desecharlos. En la norma ISO 11469 se contempla la siguiente simbología para la identificación de plásticos.

Figura 76. Identificación de Termoplásticos.



Fuente: Información sobre la simbología considerada por la ISO 11469, citado en (Ecojoguina: Diseño Ecológico de Juguetes, 2009).

Anexo 2. Adhesivos Utilizados y sus Aplicaciones en Productos de Madera

Tabla 48. Adhesivos y sus aplicaciones en productos de madera.

Grupo	Adhesivos	Aplicación
Fenólicos	Resinas de Fenol-formaldehído (PF)	Madera contrachapada, tableros de partículas, recubrimientos
	Resinas de Resorcinol-formaldehído (RF)	Propósitos especiales, madera laminada
	Resinas de Tanino-formaldehído (TF)	Madera contrachapada, tablero de partículas, madera laminada
Amiloplastos	Resinas de Urea-formaldehído	Tableros de partículas, madera contrachapada, MDF, recubrimientos
	Resinas de Melamina-formaldehído (UF)	Recubrimientos
	Resinas de Urea-melamina-formaldehído (MUF)	Madera contrachapada, tableros de partículas
Naturales	Adhesivos de proteínas	Propósitos especiales
	Resinas de sulfito líquido	Propósitos especiales
Otras	Metano-4,4 ¹ -difeníl- diisocianato (MDI)	Tableros de partículas
	Acetato Polivinilo (PVA)	Madera contrachapada, propósitos especiales

Fuente: (Wood Adhesive Innovation and Applications in North America, Sellers, 2001).

Anexo 3. Efectos del Formaldehído

Existen dos tipos de resinas de formaldehído: las de urea-formaldehído y las de fenol formaldehído. Las primeras son las que liberan una mayor cantidad de formaldehído. El formaldehído es un compuesto que se encuentra en la naturaleza, es denominado un compuesto orgánico volátil (VOC), las altas emisiones por la actividad humana se consideran un contribuyente a la destrucción de la capa de ozono y la formación de smog. Productos como lacas, selladores, pinturas, etc. que sirven para dar acabado, también son emisores de formaldehído.

La urea se produce con amoníaco y bióxido de carbono. Cuando reacciona con el formaldehído forma polímeros llamados resinas urea – formaldehído. El adhesivo que más se utiliza en la industria de los tableros aglomerados y contrachapados⁴⁵, es esta resina. La mayoría de las plantas productoras de tableros se han diseñado de acuerdo a las propiedades de esta resina.

Las mayores ventajas de la resina urea-formaldehído son:

- Bajo costo. Es la resina termoendurecible de menor costo.
- Curado rápido. Esta característica permite ciclos cortos de prensado, esto favorece la velocidad de producción.
- Color transparente. No oscurece el color de los tableros.

La utilización de la resina urea – formaldehído presenta dos principales desventajas. Una es la pérdida de durabilidad, la exposición de la resina a 100° F y a 100% de humedad dan como resultado una pérdida sustancial de su resistencia después de 8 semanas de exposición a estas condiciones.

Otra desventaja es la tendencia a emitir vapores de formaldehído cuando el tablero terminado se expone al calor o a la humedad. Los tableros emiten bajas concentraciones de formaldehído durante varios años.

En 1979, el Instituto de Toxicología Química Industrial de Estados Unidos, publicó uno de los primeros trabajos relacionados con la toxicidad del formaldehído, concluyendo que era capaz de inducir la aparición de carcinomas en la mucosa nasal de ratas en experimentación, y alertando al mismo tiempo del riesgo que representa para la salud (Ballenger, 1985) citado por (Moret, 1990).

En el 2004 la IARC (Agencia Internacional de la Investigación del Cáncer), una sección de la OMS (Organización Mundial de la Salud), recomendó modificar la clasificación del formaldehído a la de carcinógeno humano⁴⁶. En respuesta a esto, en la conferencia científica internacional sobre el formaldehído, celebrada en Barcelona en septiembre del 2007, se concluyó que “el empleo actual de formaldehído en productos de consumo y otras aplicaciones no plantea ningún riesgo para la salud humana”. En esta conferencia se clasificaron de “limitados y contradictorios”⁴⁷ los datos epidemiológicos a partir de los cuales se emitió la clasificación de la IARC.

Ambas partes concuerdan en que la exposición a altas concentraciones de formaldehído es nociva para la salud. El formaldehído es cancerígeno en ratas y ratones. Esto establece la misma posibilidad en humanos, especialmente si están expuestos al aldehído por un tiempo suficientemente largo y a concentraciones altas. El formaldehído puede ser un facilitador para otros agentes oncogénicos (Moret, 1990). Hay que contemplar el hecho de que representa un factor de riesgo laboral, ya que en la producción es donde se pueden presentar condiciones de emisión a mayor concentración.

⁴⁵ Ver **Anexo 2**.

⁴⁶ La justificación se basó en los trabajos de Hauptmann, quien dice haber descubierto un raro tipo de cáncer nasofaríngeo.

⁴⁷ Comentario formulado por el profesor Hans-Olov Adami, Presidente del Departamento de Epidemiología de la Universidad de Harvard.

Anexo 4. Test de Análisis

Este test ofrece una guía con características similares a la matriz MET, pero parte de un enfoque dirigido al diseño. Se puede utilizar para evaluar el impacto ambiental de un producto o proceso, lo cual determina un factor para argumentar la validez de la denominación como diseño ecológico al presente proyecto. Esta matriz se puede aprovechar para complementarse con otras herramientas para la evaluación de impacto ambiental.

Tabla 49. Test de Análisis.

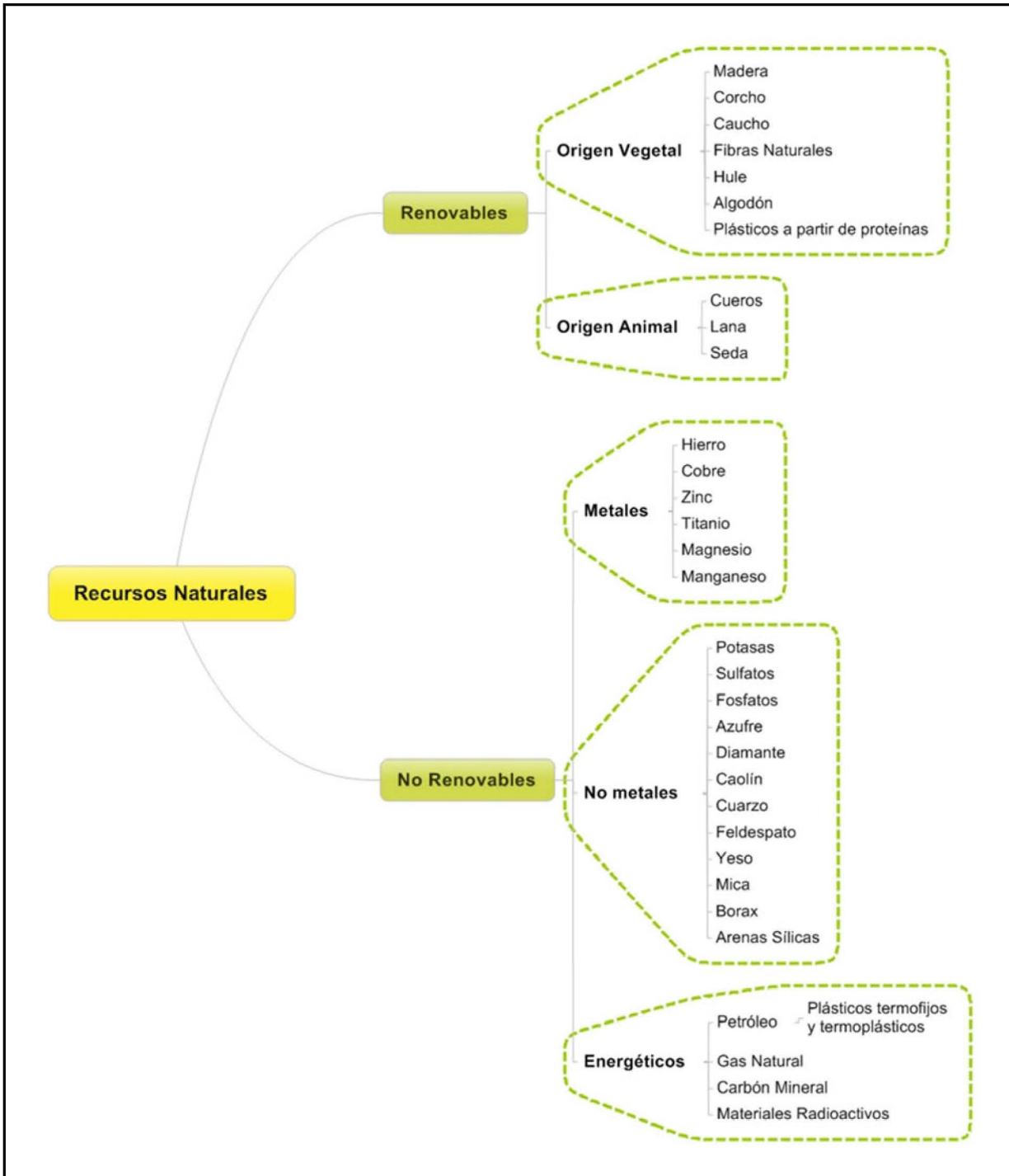
Aspectos vinculados a la sustentabilidad	
<ul style="list-style-type: none"> • Protección del hábitat. • Protección de la biodiversidad. • Protección del equilibrio climático. • Conservación de los recursos. • Conservación del agua. 	<ul style="list-style-type: none"> • Conservación de la energía. • Protección de la calidad del aire • Protección de la capa de ozono • Protección de la calidad del agua
Tipología o sistema	
Descripción sintética del sistema o tipo de producto.	
Vida útil	
A determinar en función del tipo de producto o proceso	
Aspectos conceptuales, relacionados con la prestaciones	
<ul style="list-style-type: none"> • Prestaciones básicas y complementarias • Consideración de las necesidades básicas y reducción de lo superfluo. • Rigor formal y adaptación a la necesidades reales del usuario • Adaptación a condicionantes ergonómicos y antropométricos. • Interés social. • Adaptación al entorno, ambiente o contexto. • Utilización de lenguajes intemporales • Incorporación de la dimensión histórica y respeto por el pasado. • Capacidad de síntesis, claridad y profundidad semántica en los mensajes. 	<ul style="list-style-type: none"> • Capacidad de comunicar intuitivamente los mensajes, las prestaciones y las formas de uso. • Utilización del color bajo criterios objetivos. • Facilidad de percepción sensorial y multisensorialidad. • Carácter no discriminatorio y adaptación para discapacitados. • Transmisión de valores positivos • Información al usuario sobre uso y manipulación: • Reparación y mantenimiento. • Gestión de los residuos y recogida selectiva • Posibles riesgos para la salud.
Aspectos Materiales	
<ul style="list-style-type: none"> • Cuantificación del consumo de recursos materiales y de agua • Utilización de materiales renovables. • Minimización de materiales no renovables. • Utilización de materiales reciclados o reciclables. • Utilización de materiales biodegradables. • Utilización de materiales autóctonos. • Introducción de códigos de identificación de materiales. • Utilización de materiales de larga duración. • Capacidad de envejecimiento. 	<ul style="list-style-type: none"> • Minimización del mantenimiento • Minimización de las dimensiones • Monomaterialidad o minimización de materiales distintos. • Adecuación de la calidad a los requerimientos. • No utilización de materiales compuestos (si estos no son reciclables). • Utilización de materiales que no necesitan un recubrimiento superficial. • Compatibilidad entre materiales.

Aspectos energéticos	
<ul style="list-style-type: none"> • Cuantificación del consumo de energía. • Utilización de energías alternativas. • Minimización del uso de combustibles fósiles. • Eficiencia energética. 	<ul style="list-style-type: none"> • Intensidad energética de los materiales. • Recuperación de la energía inherente. • Dispersión geográfica.
Aspectos tecnológicos y constructivos	
<ul style="list-style-type: none"> • Utilización de tecnologías limpias y saludables. • Máxima simplificación. • Máxima eficiencia. • Utilización de uniones y sistemas constructivos reversibles que permitan el desensamblaje y la recuperación de los materiales. 	<ul style="list-style-type: none"> • Optimización de las secuencias de desmontaje. • Posibilidad de reutilización y usos alternativos. • Reprabilidad y remanufacturabilidad. • Adaptabilidad.
Aspectos Productivos	
<ul style="list-style-type: none"> • Segmento de mercado. • Relación entre precio y calidad. • Accesibilidad económica. • Internalización de los costes ambientales. • Compatibilidad entre ámbito de producción y eficiencia. • Optimización de la fase de extracción de materias primas. • Optimización de la fase de fabricación de los productos. • Optimización de la fase de distribución y posventa. • Optimización de la fase de utilización. 	<ul style="list-style-type: none"> • Optimización de la fase posconsumo. • Adaptación a leyes y recomendaciones medioambientales. • Calidad de los productos y veracidad de las estrategias de mercadotecnia. • Bienestar laboral y mejora de las condiciones de trabajo. • Fomento de la participación de los trabajadores en los procesos de mejora. • Establecimiento de sistemas de prevención de accidentes y de asistencia inmediata. • Atención al usuario y servicio posventa. • Fomento al desarrollo y la autosuficiencia en el Tercer Mundo.
Generación de residuos y contaminantes	
<ul style="list-style-type: none"> • Cuantificación de residuos generados. • Minimización de los residuos en la totalidad de las fases. • Establecimiento de sistema de gestión de residuos: <ul style="list-style-type: none"> -Reciclaje en ciclo cerrado o abierto. -Recogida selectiva. -Valorización energética. -Compostaje. 	<ul style="list-style-type: none"> • Minimización de pérdidas. • Reducción de peso y volumen. • Adaptación del diseño a medidas estandarizadas. • Utilización de materiales y sustancias limpias y saludables. • No utilización o minimización de sustancias tóxicas o peligrosas. • Reducción del nivel de ruido y de vibraciones.

Fuente: (Viñolas, 2005, pág. 280).

Anexo 5. Clasificación de los Recursos Naturales

Figura 77. Clasificación de los recursos naturales.



Fuente: CHÁVEZ Aguilera, Carlos. "Conceptos Básicos para el Conocimiento de los Materiales en el Diseño Industrial". Tesis (Maestro en Diseño Industrial). México, UNAM. 2010. pág. 15.

Anexo 6. Compostaje

La biodegradación se define como un proceso natural por el cual químicos orgánicos en el medio ambiente son convertidos en compuestos más simples, mineralizados y redistribuidos a través de los ciclos elementales como el del carbono, nitrógeno y sulfuro. La biodegradación puede ocurrir solamente dentro de la biosfera, ya que los microorganismos juegan un rol central en el proceso.

El proceso más común para biodegradar materiales es el compostaje, en el cual se crea un medio óptimo (temperatura y humedad, etc.) para que ocurran los procesos de descomposición de los residuos orgánicos. La composta o compost, es el producto que se obtiene del compostaje y representa un "grado medio" de descomposición de la materia orgánica. Se denomina humus al "grado superior" de descomposición.

Durante el proceso de compostaje ocurren una serie de etapas caracterizadas por la actividad de distintos organismos, existiendo una estrecha relación entre la temperatura, el pH y el tipo de microorganismos que actúa en cada fase (Alvarez de la Puente, 2008).

- **Preparación** - Se acondicionan y mezclan los materiales de partida para regular su contenido en agua, el tamaño de las partículas, eliminar los elementos no transformables y ajustar los nutrientes para lograr una relación adecuada C/N.
- **Descomposición mesófila** - (< 40°C) Se produce una degradación de azúcares y aminoácidos por la acción de grupos de bacterias (*Bacillus* y *Thermus*).
- **Descomposición termófila** - (40-60°C) Se degradan ceras polímeros y hemicelulosa por 5 hongos del grupo de los actinomicetos (*Micromonospora*, *Streptomyces* y *Actinomyces*).

En el sector de la agricultura se demanda ampliamente la composta para ser aplicada en los cultivos, debido a que uno de sus objetivos prioritarios es el mantenimiento de la fertilidad del suelo y su actividad biológica, de esta manera se hace necesaria la incorporación de materia orgánica. Por otra parte, una de las fuentes de esta materia orgánica que tradicionalmente ha sido el estiércol, es cada vez más escasa y se hace cada vez más patente que la cantidad de estiércol existente en un futuro cercano será insuficiente para cubrir esa demanda. Los beneficios del uso de la composta en su aplicación al suelo son múltiples en los aspectos físico, químico y microbiológico. El uso de la composta, contribuye a formar y estabilizar el suelo, aumentar su capacidad para retener agua y para intercambiar cationes, haciendo más porosos a los suelos compactos y mejorando su manejabilidad (Alvarez de la Puente, 2008).

De cada 100Kg se pueden obtener 30Kg de compost, lo cual representa la oportunidad de aprovechar residuos que terminarían en un vertedero. Otro subproducto de esta actividad es el aprovechamiento del gas metano emitido durante la descomposición, por medio de un biodigestor, el cual serviría para cocina, producir electricidad y calentar el agua.

La biodegradación de la materia orgánica no ocurre sin producir impactos ambientales, durante el proceso se producen distintos gases, así como la energía necesaria para impulsar el transporte para llevar los residuos a la planta de compostaje. De igual manera a una escala industrial se utilizan distintas máquinas para llevar a cabo el proceso, las cuales consumen electricidad y combustible. Ningún proceso en el ciclo de vida está exento de producir un impacto ambiental.

El inicio del compostaje en México se remonta a finales de la década 1960 y principios de la década 1970. Los objetivos de esta iniciativa eran similares a los que se tienen actualmente: recuperar materias primas para la industria de reciclaje, prolongar la vida útil de los sitios de disposición final, y mejorar la calidad de vida de los pepenadores. Para lograr estos objetivos, los gobiernos municipales o estatales invirtieron capital para acondicionar los sitios de operación, adquirir la maquinaria necesaria y capacitar a los operadores. Desgraciadamente, cerca de una tercera parte de las plantas instaladas en México han ido cerrándose, pues por diversas razones (técnicas, económicas, administrativas, políticas y sociales) dejaron de ser viables para los municipios que las operaban. Tales fueron los casos de las plantas de Toluca, Guadalajara, Monterrey y San Juan de Aragón. Las plantas de Acapulco y Villahermosa se construyeron pero nunca operaron. También fracasaron las plantas de Oaxaca y Morelia. Por otra parte, muchas

plantas han logrado superar obstáculos diversos y han logrado mantenerse en operación a través de los años. Ejemplos de plantas que continúan en operación y que logran los objetivos de reducción de RSU llevados al sitio de disposición final, así como objetivos educativos, son las de Bordo Poniente, Cuautitlán Izcalli, Atizapán de Zaragoza, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Universidad Autónoma Metropolitana (UAM), Jiutepec, Querétaro y Jalapa, entre otros (Instituto Nacional de Ecología).

Tabla 50. Plantas de compostaje en México.

Nombre	Entidad federativa	Situación actual
PdC Bordo Poniente	DF	activa
PdC de la Deleg. Alvaro Obregón	DF	activa
PdC de la Deleg. Miguel Hidalgo	DF	cerrada
PdC de la Deleg. Milpa Alta (5 plantas)	DF	activa
PdC de la Deleg. Xochimilco	DF	activa
PdC del Centro de Educ. Ambiental Ecoguardas	DF	activa
PdC del Centro de Educ. Ambiental de Xochimilco	DF	activa
PdC de Unidad Habitacional Independencia en la Deleg. Magdalena Contreras	DF	activa
PdC de San Juan de Aragón	DF	cerrada
PdC piloto de la UAM Iztapalapa	DF	activa
PdC de la UNAM	DF	activa
PdC del IPN	DF	activa
PdC del ITESM	DF	activa
PdC de residuos de pescados	DF	activa
PdC de Cuautitlán Izcalli	México	activa
PdC del Centro de Educ. Ambiental Yauclika	México	activa
PdC de Cuautitlán México	México	activa
PdC de Atizapán de Zaragoza	México	activa
PdC de Capulhuac	México	activa
PdC de Texcalyacac	México	activa
PdC de San Lorenzo Huehuetitlan Tianguistenco	México	activa
PdC de Xalatlaco	México	activa
PdC de Amecameca	México	activa
PdC de Nezahualcóyotl	México	reactivando
PdC de Tlalmanalco	México	cerrada
PdC de Tultepec	México	cerrada
PdC de Hueypoxtla	México	N/D
PdC de Tepetlixpa	México	activa
PdC de Tultitlán	México	reactivando
PdC de Cocotitlán	México	reactivando
PdC de Apaxco	México	cerrada
PdC de Huixquilucan	México	N/D
PdC de la Universidad Tecnológica Fidel Velázquez	México	activa
PdC de la Universidad Autónoma Chapingo	México	activa
PdC de Toluca	México	activa
PdC de Valle del Bravo	México	construcción
PdC de Monterrey	Nuevo León	cerrada
PdC de Aguascalientes	Aguascalientes	N/D
PdC de Acapulco	Guerrero	nunca operó
PdC de Tonalá	Jalisco	cerrada

Nombre	Entidad federativa	Situación actual
PdC de Querétaro	Querétaro	activa
PdC de Morelia	Michoacán	cerrada
PdC TepozEco	Morelos	cerrada
PdC de Jiutepec	Morelos	activa
PdC Tehuixtla	Morelos	cerrada
PdCTIPMOR	Morelos	activa
PdC de Cuernavaca	Morelos	activa
PdC Rancho Los Molinos	Morelos	activa
Programa integral Teocelo	Veracruz	activa
PdC de Jalapa	Veracruz	activa
PdC de Mérida	Yucatán	activa
PdC de Oaxaca	Oaxaca	cerrada
PdC de Villahermosa	Tabasco	nunca operó
Cooperativa Orgánica del Centro Ecol. Akumal	Quintana Roo	activa
PdC de Xcaret	Quintana Roo	N/D

PdC – Planta de compostaje

Fuente: Instituto Nacional de Ecología, 2005.

Anexo 7. Residuos Sólidos Urbanos

A partir de los distintos escenarios de fin de vida tanto de los productos preconsumo y postconsumo, podemos identificar que se producen diferentes residuos.

El Instituto Nacional de Ecología (INE) hace una clasificación de los residuos en tres categorías:

- Emisiones a la atmósfera
- Descargas de aguas residuales
- Residuos sólidos

Debido a la extracción, procesamiento, transporte, distribución y uso de los productos que ofrece la sociedad, se generan residuos sólidos los cuales han sido clasificados en tres tipos por el INE:

- residuos peligrosos (RP).
- residuos sólidos urbanos (RSU)
- residuos de manejo especial (RME).

El diseño de productos está directamente relacionado con la producción y acumulación de residuos sólidos urbanos, ya que abarca sectores como el de los electrodomésticos, productos desechables, muebles, etc. Este tipo de productos son susceptibles a ser desechados por obsolescencia programada, implicando que el producto puede seguir funcionando y ha sido remplazado, lo cual implica la generación de miles de toneladas de residuos.

Los alcances de esta investigación no contemplan la explicación a fondo de los diferentes tipos de residuos, ni tampoco su procedencia, sin embargo al asociar comúnmente la actividad del diseño industrial y de manera específica el diseño de producto, con la producción de residuos sólidos, surge como importante analizar la problemática en México. Las características de los materiales que componen un producto determinan las diferentes opciones para su disposición final.

Es importante resaltar que a pesar de llamarse residuos sólidos, en general existen muchos líquidos y gases contenidos en los mismos, ya sea mezclados o asociados. La Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos define a los residuos sólidos como:

Los generados en las casas habitación, que resultan de la eliminación de los materiales que utilizan en sus actividades domésticas, de los productos que consumen y de sus envases, embalajes o empaques; los residuos que provienen de cualquier otra actividad dentro de establecimientos o en la vía pública que genere residuos con características domiciliarias, y los resultantes de la limpieza de las vías y lugares públicos, siempre que no sean considerados por esta Ley como residuos de otra índole (INE).

Para acotar el estudio de esta problemática nos enfocaremos en los residuos sólidos urbanos. Al acumular los RSU y no reincorporarlos a la naturaleza en un corto o mediano plazo, se genera contaminación. Esta contaminación afecta diferentes aspectos del medio ambiente como al suelo, aire, ríos, lagos, mares, plantas, animales y a las personas. Los problemas de salud pública causados por la acumulación de los RSU a cielo abierto son numerosos, sin mencionar las graves afectaciones al mismo medio ambiente. Los procesos de ordenamiento ecológico consistentemente identifican a los RSU como problemas ambientales a resolver, pues no sólo afectan a los asentamientos humanos en donde se generan, sino también a los ambientes rurales (tanto naturales como productivos) que los rodean (INE). No se pretende describir la gestión de residuos sólidos urbanos que se realiza en México debido a la extensión del tema, el punto de interés yace en la relación de los residuos sólidos con el diseño de producto.

En el año 2008 se produjeron 37,597 toneladas de residuos sólidos urbanos en México (**Tabla 51**) (FAOSTAT, 2010). Estos residuos se pueden separar en relación a su composición en vidrios, metales, textiles, plásticos, papel y cartón y basura de comida jardines y materiales orgánicos similares.

Tabla 51. Generación de residuos sólidos urbanos por tipo de residuo de 1992 al 2008.

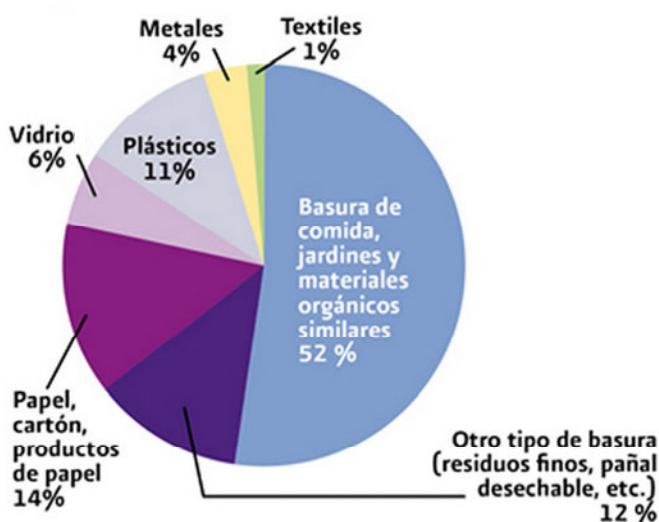
Tipo de residuo	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
Papel, cartón, productos de papel	4 526.83	4 904.50	5 160.00	5 275.00	5 338.00	5 489.30	5 199.40
Textiles	479.39	497.00	520.10	530.00	542.00	552.00	537.60
Plásticos	1 409.20	2 014.40	2 115.80	2 161.80	2 208.00	2 223.00	4 094.10
Vidrios	1 898.24	2 156.00	2 210.00	2 262.00	2 309.00	2 341.00	2 210.60
Metales ^a	933.03	1 046.70	1 160.00	1 186.10	1 210.00	1 298.00	1 293.20
Basura de comida, de jardines y materiales orgánicos similares ^b	16 858.97	16 592.80	17 440.80	17 968.00	18 335.00	18 576.00	19 707.30
Otro tipo de basura (residuos finos, pañal desechable, etc.)	6 067.94	5 704.30	5 995.80	6 022.00	6 143.00	6 385.70	4 552.80
Total	32 173.60	32 915.70	34 602.50	35 404.90	36 085.00	36 865.00	37 595.00

Nota: Los cálculos de la generación para el año 2004, se hicieron con estricto apego a las proyecciones de población de CONAPO, que resultaron ser ligeramente superiores a los datos de población que se manejaron por la SEDESOL; razón por la que se podrá observar un ligero incremento más allá de las tendencias que se venían observando del 2000 al 2003.

^a Incluye: aluminio, ferrosos y otros como cobre, plomo, estaño y níquel.

^b La parte orgánica de la basura en su proceso de descomposición natural (en la parte anaerobia), genera distintos gases conocidos como biogás, en el que aproximadamente el 50% es CO₂ y el otro 50% es gas metano, mismo que debe quemarse (acuerdos internacionales para el control de emisiones de gases de invernadero y por balance estequiométrico se reducen los gases de invernadero al 9.5%), lo deseable es aprovechar su poder calorífico para generar alguna fuente de energía; cuando la descomposición es controlada con un proceso aeróbico, se obtiene un mejorador de suelo conocido como composta. FUENTE: SEDESOL. Dirección General de Equipamiento e Infraestructura en Zonas Urbano-Marginadas. Abril, 2009.

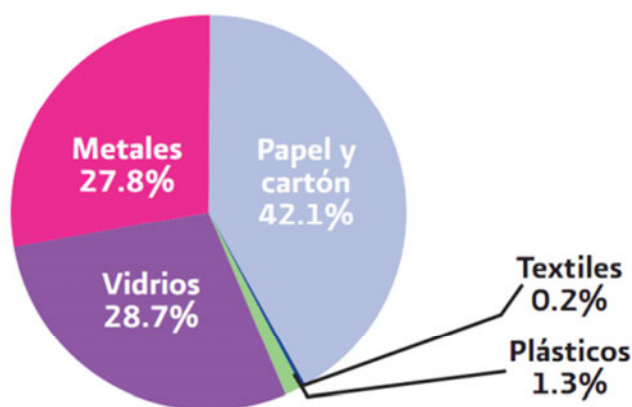
Figura 78. Composición de los residuos sólidos urbanos en el 2008



Fuente: (El Medio Ambiente en México 2009: en Resumen, 2009, pág. 48)

La producción de residuos plásticos corresponde al 11% del total de los RSU generados (4094.1 toneladas), estos residuos representan distintos problemas para su disposición final, ya que necesariamente existe un impacto asociado con cualquiera de los diferentes escenarios de fin de vida útil de los productos. En relación con la información proporcionada por la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), en el año 2008 únicamente se recuperó dentro de la economía formal el 1.3% de los residuos plásticos. Esto implica que el resto de los residuos plásticos terminó en un porcentaje no declarado en economía informal y el resto en un tiradero, o un relleno sanitario.

Figura 79. Reciclaje de RSU por Composición 2008



Fuente: (El Medio Ambiente en México 2009: en Resumen, 2009, pág. 49)

Esta información hace constancia de la problemática de los residuos sólidos urbanos, relacionada directamente con la etapa de disposición final del ciclo de vida. Destacamos la situación de los residuos plásticos ya que ha sido una de las principales causas para el desarrollo de los biopolímeros, lo que presenta una oportunidad para contrarrestar este problema.

Anexo 8. Intensidad Energética de los Materiales

El término de energía inherente ofrece información sobre la cantidad total de energía necesaria para producir un material, a lo largo de las diversas fases implicadas en su ciclo de vida, desde la obtención de materias primas hasta su transformación, fabricación, transporte, instalación, uso mantenimiento y gestión de los residuos. De esta manera podemos obtener una noción de cómo se puede contribuir o no al aumento del impacto ambiental asociado con el consumo de energía del ciclo de vida del producto, por la elección de un material determinado. Viñolas nos presenta información acerca de la intensidad energética de algunos materiales comunes.

Tabla 52. Energía Inherente de Algunos Materiales Comunes.

Material	Energía Inherente (MJ/Kg)	Material	Energía Inherente (MJ/Kg)
Maderas		Tela asfáltica	10
• Conífera	3	Yeso	3.3
• Tropical (sin transporte)	3	Cemento	7
• Tablero aglomerado de partículas	14	Pintura y barniz	
• Tablero contrachapado	5	• Sintética (esmaltes), ecológica	100
Metales		• Sintética (esmaltes)	100
• Acero 20% reciclado	35	Muro ladrillo cerámico	
• Acero 10% reciclado	17	• Hueco	2.96
• Aluminio primario	215	• Macizo perforado	2.85
• Aluminio comercial 30% reciclado	160	• Macizo	2.86
• Aluminio 100% reciclado	23	Plásticos	
• Cobre primario	90	• Polietileno (PE) primario	77
• Ladrillos y tejas	4.5	• Polipropileno (PP)	80
• Cerámica vitrificada	10	• Poliestireno expandido (EPS)	100
• Cerámica para sanitarios	27.5	• Poliestireno extruído (XPS) con HCFC	100
Hormigón		• XPS con CO ₂	100
• H-150	.99	• Poliuretano (PUR) con HCFC	70
• H-175	1.03	• PUR con CO ₂	70
• H-200	1.1	• Policloruro de vinilo (PVC) primario	80
Fibro cemento		Vidrio	
• De amianto	6	• Plano para acristalamiento	19
• De madera o fibras sintéticas	9		
Fibra de vidrio	30 - 50		
Fibra de carbono	130		
Fibras lignocelulósicas	4 - 15		
Arena	0.1		
Grava	0.1		

Fuente: Company profiles/.Working conditions: Factories in china Producing Goods for Export to the U.S., No logo, pág. 519 -520, citado por (Viñolas, 2005, pág. 248).

Es importante destacar que la extracción y producción de recursos naturales renovables, como lo son las fibras vegetales, representan una oportunidad de reducir el consumo energético. Esta información es de suma utilidad ya que antes de considerar la extracción de un recurso podemos estimar la energía que se requerirá para su implementación y de esta manera se pueden tomar decisiones informadas y en congruencia con los objetivos de un proyecto.

Anexo 9. Producción de Tequila

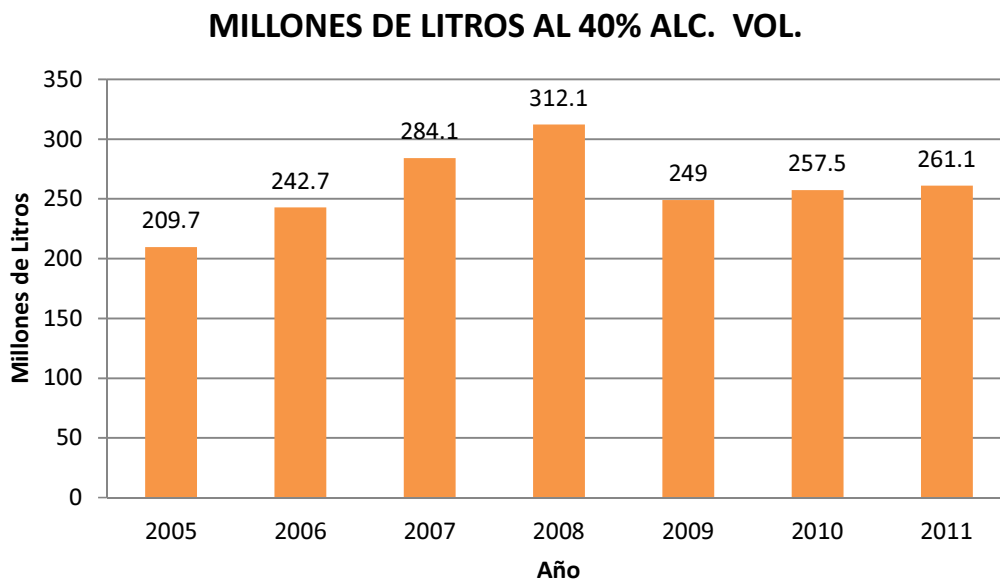
Producción de tequila y tequila 100% de agave

La producción total de ambas categorías de tequila al cierre del primer trimestre de 2012 ascendió a 64.2 millones de litros a 40 por ciento alcohol volumen. Esta cifra representa 1.9% más que lo producido en 2011 durante el mismo período (63 millones de litros). De la categoría tequila se elaboraron 34.2 millones de litros, cifra 24.4% mayor a la del año pasado, cuando se fabricaron 27.5 millones de litros. Por otro lado, el destilado 100% de agave sumó 30 millones de litros producidos de enero a marzo de 2012.

Contrario a la otra categoría, la fabricación de la categoría 100 por ciento cayó 15.5%, ya que en 2011 se elaboraron 35.5 millones de litros a 40% Alc. Vol. (Consejo Regulador del Tequila, 2012).

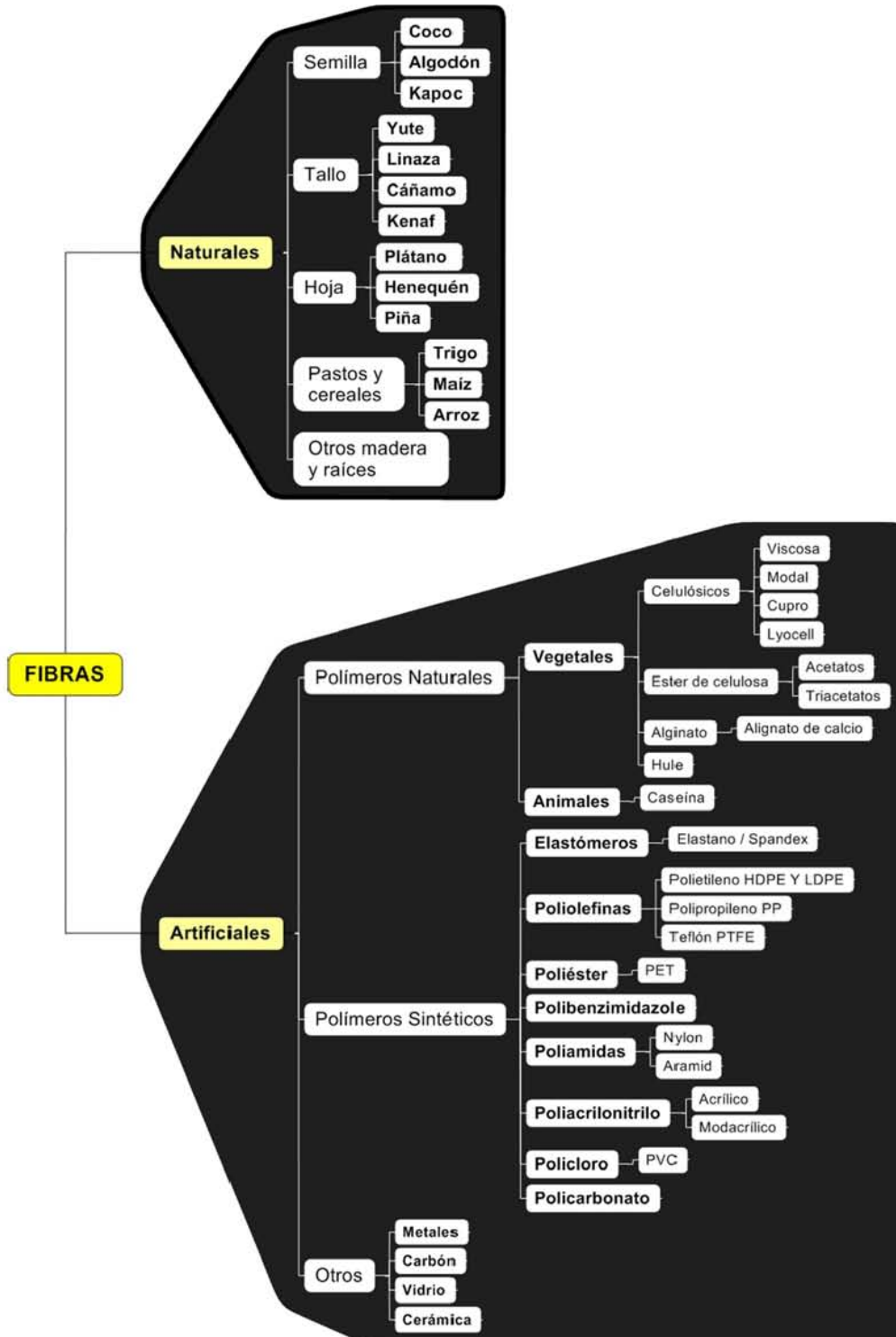
La tendencia en la producción del tequila se puede apreciar que es ascendente a partir de 2005, pero en el 2009 hubo una disminución del 37.4% en la producción total. A partir de ese año la producción a tendido a crecer aumentando 4.85% de 2009 a 2010. Estas cifras nos sirven para comprobar que el consumo de Agave y la producción de tequila ha cambiado con el paso del tiempo pero está lejos de terminarse, por lo tanto la producción de bagazo como residuo de la extracción de jugos de la piña continúa, así como la falta de su aprovechamiento.

Figura 80. Producción de Tequila.



Anexo 10. Clasificación General de las Fibras

Figura 81. Clasificación general de las fibras.



Fuente: Información obtenida de IDEmat. Design for Sustainability Program. Delft University of Technology, Base de datos en línea. Disponible en < <http://www.idemat.nl/>>.

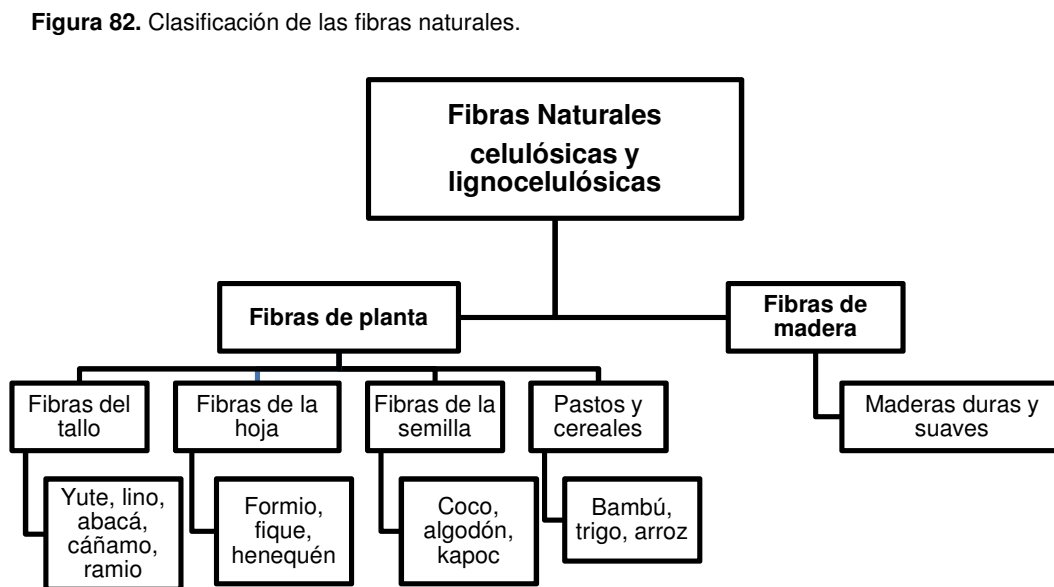
Anexo 11. Fibras Naturales

Las fibras naturales han sido utilizadas desde tiempos remotos como un recurso natural renovable, que se ha implementado extensivamente para la fabricación de textiles, construcción, etc. Es fácil decir que las fibras naturales son renovables y sustentables, pero de hecho no son ninguna de las dos. Las fibras naturales provienen de plantas, y son las plantas vivas lo que es renovable y sustentable, no las fibras como tal. Esto implica que debemos fomentar el cuidado de los bosques y las tierras de cultivo.

En términos de uso, hay dos clasificaciones generales de plantas que producen fibras, primaria y secundaria:

- Las plantas primarias son aquellas sembradas por su contenido de fibra. Ejemplo de fibras primarias: yute, cáñamo, kenaf, henequén y algodón.
- Las plantas secundarias son aquellas en que la fibra se obtiene como un subproducto de algún uso primario. Ejemplo de fibras secundarias son: fibras del bagazo de la piña del agave, fibras de palma, fibra de coco, etc.

La clasificación más común para las fibras naturales es con base al tipo botánico. De acuerdo a este sistema, existen cinco tipos básicos de fibras naturales celulósicas y lignocelulósicas:



Fuente: (Mohanty, Misra, y Drzal, 2005, pág. 21)

Anexo 12. Propiedades de las Fibras Naturales

Al determinar las propiedades de las fibras naturales es necesario considerar que se está tratando con recursos naturales, que están fuertemente influidos por factores como: el ambiente de crecimiento, temperatura, humedad, la composición del suelo y el aire, todos estos factores afectan la altura de crecimiento de la planta, fuerza de las fibras, densidad, etc. También la forma en que las plantas son cosechadas y procesadas, produce variaciones en las propiedades, por lo que es posible encontrar variaciones en los datos reportados.

Para obtener un marco de referencia se enlistan las propiedades mecánicas de algunas fibras naturales importantes.

Tabla 53. Propiedades mecánicas de algunas fibras naturales.

Fibra	Densidad (g/m ³)	Resistencia a la Tensión (MPa)	Módulo de Young (MPa)
Cáñamo	1.48	514	24800
Yute	1.3 – 1.45	393-773	13000-26500
Lino	1.50	345-110	27600
Sisal	1.45	468-640	9400-22000
Coco	1.15	131-175	4000-6000
Ramie	1.51	500	44000
Algodón	1.51	400	12000

Fuente: (A review of current development in natural fiber composites for structural and infrastructure applications, 2010, pág. 2).
1 MPa (Mega Pascal) = 1 N/mm²

Requerimientos de Energía para las Fibras Naturales

La siguiente comparación indica que el consumo energético es menor en la producción de algunas materias primas a partir de recursos renovables, en comparación con materiales como el aluminio y la fibra de vidrio (**Tabla 54**). En la fuente de esta información, no se afirma contemplar todos los factores que considera Viñolas para definir la energía inherente (ver **Anexo 8**. Intensidad Energética de los Materiale), aun así es importante considerarla para obtener un marco de referencia.

Tabla 54. Consumo de energía fósil para algunos materiales importantes.

Material	CONSUMO DE ENERGÍA	
	Ton. Aceite */Ton. de material	Ton. Aceite/m ³ de material
Aluminio	5.6	15.1
Fibras de vidrio	1.6	4.0
Fibras vegetales (cultivo)	0.04	0.05
Fibras vegetales (procesadas)	0.07	0.08
Resina epóxica	4.2	5.0
Fibra de vidrio / resina (70% de volumen de fibra)	2.0	4.3
Fibra vegetal / resina (70% de volumen de fibra)	1.3	1.6

Fuente: Héctor Belmares et al. (El Uso de Fibras Duras como Material de Construcción. Estado de Avance).

* El consumo de energía fósil se expresa en relación a 1 tonelada de aceite por 1 tonelada de material producido, así como 1 tonelada de aceite por metro cúbico de material.

La fibra de vidrio requiere de un consumo elevado de energía para su manufactura, porque implica el uso de altas temperaturas. En relación a las fibras naturales, podemos apreciar que se requiere una menor cantidad de energía para su fabricación, incluso las resinas utilizadas para unir las fibras, requieren de un mayor consumo de energía que las fibras naturales en sí mismas.

Esto se presenta como una oportunidad para disminuir el impacto ambiental del producto ya que la información presentada indica que tanto en el cultivo como el procesamiento requieren de un menor consumo de energía. La información presentada permite hacer una prospección del resultado, sin embargo solamente la evaluación del ciclo de vida del material ayudará a realizar una aproximación más precisa del impacto ambiental causado.

Anexo 13. Análisis de Ciclo de Vida

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una herramienta de gestión medioambiental que permite conocer y valorar los impactos ambientales asociados al ciclo de vida de los productos, procesos o actividades. De esta manera se considera fundamental su aplicación para lograr optimizar el ciclo de vida de un producto, proceso o servicio diseñado.

En la metodología del ACV se considera la totalidad de las fases que intervienen en un producto, proceso o actividad (Viñolas, 2005):

- **Extracción**, transformación y transporte de materias primas.
- **Fabricación**, transporte y distribución de los productos.
- **Utilización**, reutilización y mantenimiento de los productos.
- **Disposición final**, reciclaje, remanufactura, incineración y relleno sanitario.

Metodología del ACV

La metodología aceptada en la serie de normas ISO 14040 organiza el análisis de ciclo de vida en cuatro fases, siendo similar a la metodología propuesta por la Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC):

- Objetivos y Alcances
- Análisis de inventario
- Evaluación de Impacto Ambiental
- Interpretación

Limitantes para el ACV

Aun cuando el acercamiento holístico al análisis ambiental del ACV es una de sus mayores ventajas, también es una limitante. Un ACV completo requiere de la consideración de entradas y salidas de la extracción de materia prima a su desecho, sin embargo en la práctica se ha demostrado que es muy difícil incluir todos los aspectos adecuadamente y esto puede llevar a la simplificación de ciertas fases del ACV. Una limitante mayor del ACV es la gran cantidad de datos requeridos para desarrollar un inventario. Así como la dificultad relacionada con recolectar los datos, calidad de la información y precisión son problemas comunes que limitan el valor informativo de los resultados de la mayoría de los estudios de ACV (Caroline, 2004).

En esencia el Análisis del Ciclo de Vida pretende otorgar una medición lo más exhaustiva posible del impacto ambiental de productos, procesos o servicios que se estén investigando. Considerando la dificultad que presenta llevarlo a cabo correctamente, se pondrá énfasis en cuidar elementos como el objetivo, alcance y limitantes del sistema.

Otra limitante importante es el hecho de que actualmente los pilares social, cultural y económico no están integrados a la implementación de herramientas como programas de computación (por ej. Simapro). Se puede anticipar una incertidumbre en relación a la sustentabilidad que tendrá el producto, lo que se puede evaluar es el impacto ambiental y relacionarlo con un contexto específico para interpretar la afectación en los factores no considerados por la metodología del ACV.

Anexo 14. Impactos Ambientales en el Ciclo de Vida del PLA

A continuación no se pretende presentar información detallada acerca del ACV del biopolímero PLA, el interés recae en la comparativa con los polímeros petroquímicos, lo cual ofrece importante información relacionada con las características que tendrá el material biocompuesto seleccionado, así como las ventajas y desventajas frente a los compuesto que utilizan como matriz termoplásticos petroquímicos. La fuente de información proviene de un artículo cuyo caso de estudio es el PLA producido por la empresa Cargill Dow®, bajo la marca Nature Works™, lo cual coincide con la materia prima que se utilizó en la experimentación, de esta manera se considera adecuado el uso de esta información para analizar los impactos producidos durante el ciclo de vida del PLA. (T.H. Vink, R. Rábago, A. Glassner, y R. Gruber, 2003).

A manera de síntesis se presenta información de los impactos ambientales en el ciclo de vida, utilizando dos escenarios: el PLA1 y el PLA B/EE, el primero siendo el métodos actualmente utilizado para producir PLA, y el segundo escenario es una proyección del uso de biomasa (B) como materia prima y energía eólica (EE) para la producción de electricidad requerida en lugar de obtenerla de la red local. Como objetivo para lograr disminuir los impactos ambientales durante la producción de PLA, se identifican cinco diferencias clave entre los dos escenarios (PLA 1 / PLA B/EE):

- En lugar de obtener la dextrosa derivada del maíz, la principal materia prima es el residuo de la siembra del maíz y otros cultivos (tallos, paja, cáscara y hojas).
- La celulosa y hemicelulosa serán convertidos en azúcares fermentadas en una *biorefinería*. El residuo restante rico en lignina será incinerado o gasificado para producir vapor y utilizarlo como energía termal para varios de los procesos de conversión.
- Más adelante el proceso de producción de ácido láctico será optimizado para reducir la materia prima y aumentar el rendimiento.
- En lugar de utilizar electricidad de la red local, los requerimientos adicionales de energía provendrán de energía eólica
- Optimización de la eficiencia energética de las instalaciones para producir polímeros y lácticos.

Contemplando los escenarios antes mencionados, podemos dividir los impactos ambientales de la siguiente manera:

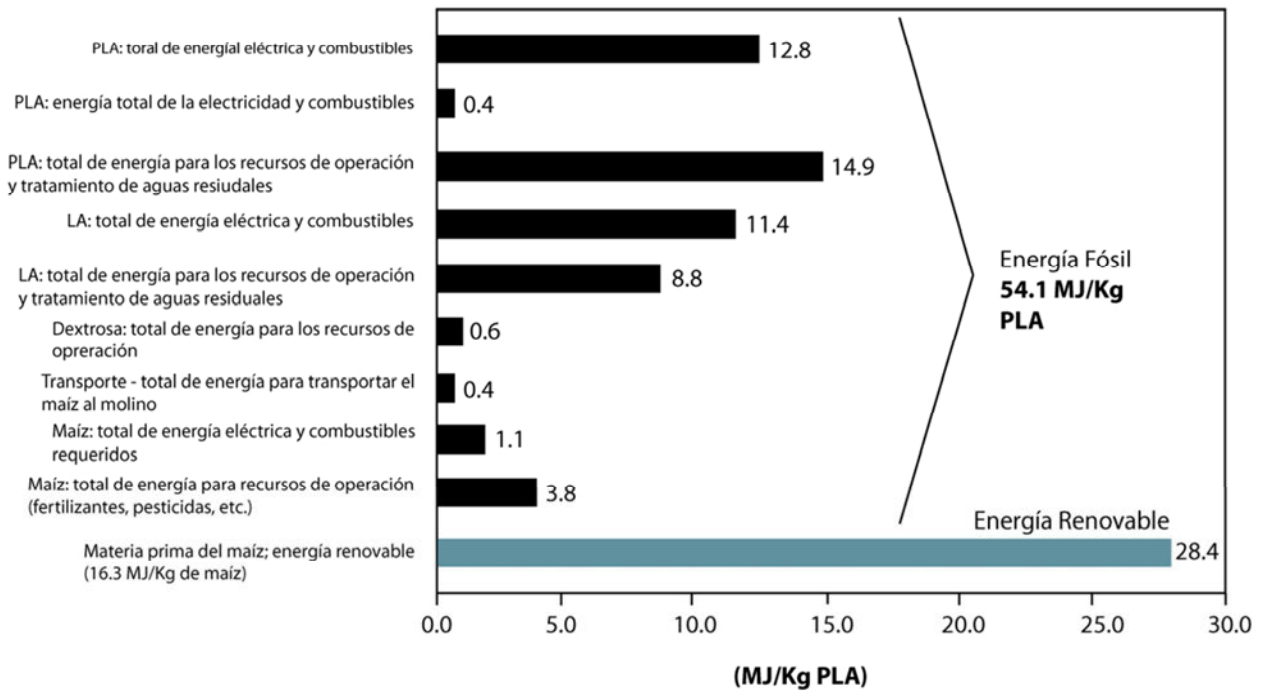
1. Contribuciones al requerimiento total de energía para el PLA 1
2. Uso de energía fósil
3. Cambio climático global
4. Uso de agua
5. Reducciones potenciales del uso de energía fósil del poliláctico

Esta información puede aportar un acercamiento para aquellos que pretendan realizar un Análisis de Ciclo de Vida acerca de un material biocompuesto que utilice una matriz de PLA.

1. Contribuciones al requerimiento total de energía para el PLA 1

La contribución al Requerimiento Total de Energía (RTE) para el PLA1 son 85 MJ/Kg acumulado en el ciclo de vida desde el cultivo del maíz hasta la producción de materia prima (pellets) lista para enviarse. En la **Figura 83** se puede apreciar los diferentes aspectos para la cuantificación del requerimiento energético.

Figura 83. Contribuciones al requerimiento total de energía para el PLA1.



Fuente: (T.H. Vink, R. Rábago, A. Glassner, y R. Gruber, 2003, pág. 412).

LA: ácido láctico

PLA: poliácido láctico

- 28.4 MJ representan la materia prima del maíz (15% humedad) usada para producir 1 Kg de PLA. Esta es la parte donde se utiliza energía renovable, usando el calor de la combustión del maíz (16.3 MJ/Kg de maíz). Esta cantidad es fija y sólo se puede disminuir usando menos maíz.
- El uso total de energía fósil (UTEF) es de 54.1 MJ/Kg de PLA, equivalente al RTE menos la energía de la materia prima del maíz (calculado como $82.5 - 28.4 = 54.1$ MJ/Kg). Los mayores contribuidores al UTEF son: carbón, aceite, gas y energía nuclear. El UTEF es un dato importante ya que es el indicador del uso de energía fósil así como la emisión de carbono de la tierra a la atmósfera en conexión con las emisiones de óxidos de sulfuro, hidrocarburos y metales pesados.
- El UTEF para cultivar maíz y enviarlo al molino de maíz húmedo (MMH) es la suma de los ingresos total relacionado con los recursos utilizados en el cultivo (3.8 MJ/Kg), electricidad y combustibles utilizados (1.1 MJ/Kg), y energía para el transporte del maíz al molino (0.4 MJ/Kg). Estas entradas representan el 9.8% del UTEF para el PLA.
- El UTEF para convertir el almidón del maíz en dextrosa es de 9.4 MJ/Kg de PLA o 17.4% del UTEF del PLA.
- El UTEF estimado para la producción de ácido láctico es de 26.3 MJ/Kg de PLA o 40% de la energía fósil utilizado para el PLA.
- Un adicional de 13.2 MJ/Kg de PLA o 24% es usado para el láctico seguido de la producción de PLA a partir del ácido láctico.

En conjunto la producción de ácido láctico y PLA representa el 73% del UTEF para el PLA, estos procesos se presentan como objetivos para hacer mejoras en la eficiencia energética. La implementación de procesos renovables para la producción de energía tiene el potencial para disminuir los impactos

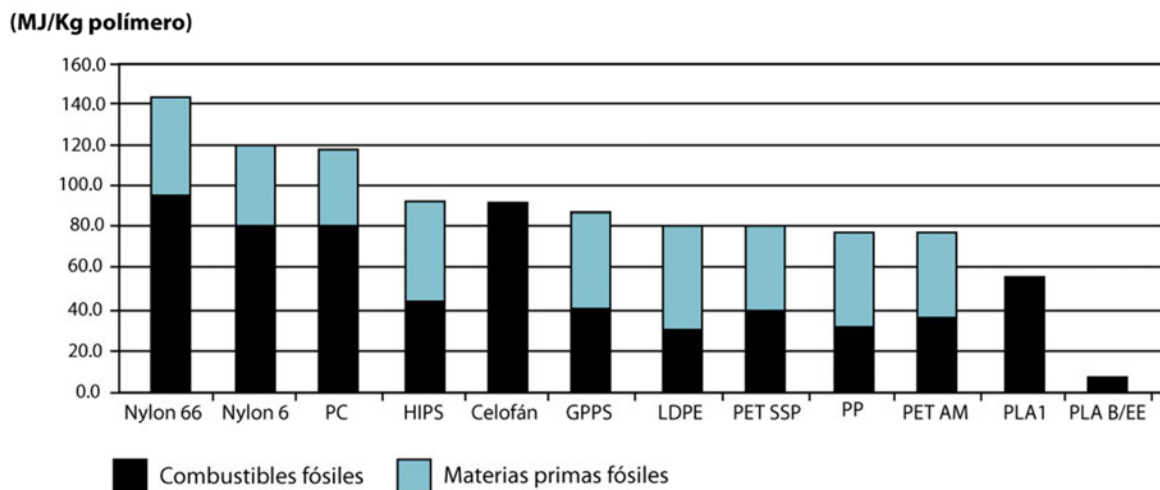
ambientales asociados con los requerimientos de energía. Estas opciones empiezan a parecer más atractivas para la empresas, como Cargill Dow®, que buscan mejorar el rendimiento ambiental de sus productos.

2. Uso de energía fósil

La comparación de uso de energía fósil entre los polímeros petroquímicos contra los dos escenarios descritos para el PLA, nos muestra la diferencia de requerimientos energéticos entre ambos tipos de polímeros, siendo válida la información para los polímeros producidos en Europa.

- El PLA de primera generación (PLA1) usa de 25-55% menos energía que los polímeros petroquímicos.
- La realización de un escenario PLA B/EE permitiría la reducción de hasta del 90% comparado con cualquiera de los polímeros petroquímicos. Esta comparación representa un gran potencial de mejorar la eficiencia ecológica de los productos que conformen.
- La sustitución de materia prima del maíz, por la biomasa procedente de otros cultivos, incluido el del maíz, mejoraría notablemente la disminución de uso de energía fósil utilizada en la siembra de maíz.

Figura 84. Comparativa de uso de energía entre polímeros.



Fuente: (T.H. Vink, R. Rábago, A. Glassner, y R. Gruber, 2003, pág. 414).

Nomenclatura – PC: Policarbonato, HIPS: Poliestireno de alto impacto, Celofán, GPPS: Poliestireno de uso general, LDPE: Polietileno de baja densidad, PET SSP: Polietileno tereftalato polimerización de estado sólido, PP: Polipropileno, PET AM: Polietileno tereftalato amorfo (grado para fibras y películas), PLA1: Políácido láctico (primera generación), PLA B/EE: Políácido láctico (producción en biorefinería y uso de energía eólica).

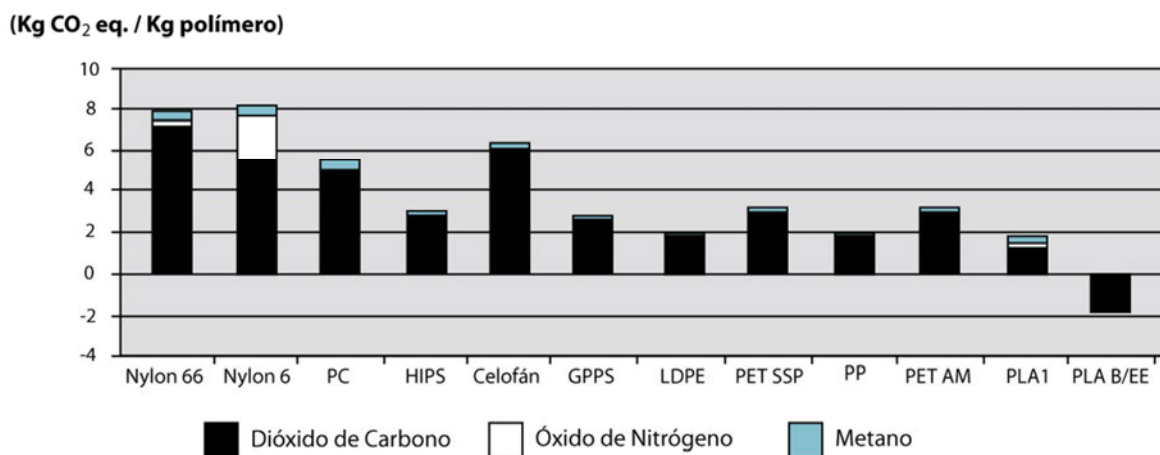
En la **Figura 84** se muestran los requerimientos de energía de algunos polímeros petroquímicos y poliácido láctico. La parte de color claro de las barras representa la energía fósil utilizada como materia prima química (para construir la cadena de polímeros). La parte sólida de cada barra representa el total de energía fósil utilizada como combustibles y para los recursos de operación usados en los procesos de producción (T.H. Vink, R. Rábago, A. Glassner, y R. Gruber, 2003).

3. Cambio climático global

El cambio climático global ha sido identificado tal vez como el problema más importante de este siglo. La emisión de gases de efecto invernadero no son exactamente las mismas que las emisiones por la combustión de recursos fósiles, ya que diversos gases que no provienen de la combustión pueden contribuir al cambio climático global. La relación entre ambos tipos de emisión se debe a que la combustión de los combustibles fósiles es la fuente de la mayoría de gases de efecto invernadero que produce el ser humano.

En la **Figura 85** se hace una comparación de la contribución al cambio climático global, de ciertos polímeros petroquímicos, así como los dos escenarios de PLA mencionados. De acuerdo con el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés), los tres gases de efecto invernadero con mayor volumen son: CO₂, CH₄, y N₂O. Estos tres factores fueron utilizados en el análisis de Cargill Dow®.

Figura 85. Comparación de la contribución al cambio climático de diferentes polímeros y PLA.



Fuente: (T.H. Vink, R. Rábago, A. Glassner, y R. Gruber, 2003, pág. 415).

Al igual que en la comparación del uso de energía fósil, en el análisis se comparan polímeros convencionales con el PLA de "cuna" a la fabricación de pellets. Todos los valores de las emisiones fueron convertidos al equivalente en CO₂ para facilitar la comparación.

Este análisis demuestra que el proceso de producción del PLA1 tiene una ventaja sobre algunos polímeros y es comparable con otros. Lo que surge como más interesante son los beneficios en la reducción del efecto invernadero, que representa la transición a residuos del maíz (lignina) y el uso de energía eólica para complementar los requerimientos de energía de la planta de producción.

El uso de la porción de lignina de la materia prima lignocelulósicas para la generación de calor para los procesos de ciclo cerrado en cuanto al carbono relacionado con la energía, y en combinación de otros factores, se logra obtener un impacto negativo por la emisión de gases de efecto invernadero para la producción de pellets de PLA (T.H. Vink, R. Rábago, A. Glassner, y R. Gruber, 2003). El análisis de ciclo de vida demuestra que ningún polímero petroquímico puede competir con la disminución de los gases de efecto invernadero del escenario de producción del PLA mediante una biorefinería y el uso de energía eólica. Aun cuando el desecho de los productos de PLA, ya sea por combustión, compostaje u otro medio convencional, implica un retorno de dióxido de carbono a la atmósfera, su ventaja se mantiene.

CONTACTO

Es muy probable que dentro del contenido de este documento se haya omitido algún aspecto o recomendación importante, por lo que se pide de la manera más atenta la retroalimentación de la información expuesta con el objetivo de complementarla.

Por favor dirija sus comentarios a la siguiente dirección de correo electrónico:

- leonardoea@gmail.com

Leonardo Echeverría Arjonilla

México, Distrito Federal.