

**EVALUACIÓN TÉCNICA Y ANÁLISIS DE COSTOS PARA EL PROCESO DE
PRODUCCIÓN DE BIOFILM APROVECHANDO RESIDUOS DE PAPEL DE OFICINA
GENERADOS POR LA EMPRESA INTERNATIONAL HOUSE BOGOTÁ**

**SANTIAGO ANDRÉS GORDILLO MEDINA
MARÍA PAULA RODRÍGUEZ GODOY**

**PROYECTO INTEGRAL DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE:
INGENIERO QUÍMICO**

**DIRECTOR:
DANY JOSÉ CÁRDENAS ROMAY
MSC. INGENIERO QUÍMICO**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C.**

2022

NOTA DE ACEPTACIÓN

Nombre

Firma del Director

Nombre

Firma del Presiente Jurado

Nombre

Firma del Presiente Jurado

Bogotá D.C. marzo de 2022

DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector de Claustro

Dr. Mario Posada García Peña

Vicerrector Académico de Recursos Humanos

Dr. Luis Jaime Posada Garcia-Peña

Vicerrectora Académica y de Investigaciones

Dra. Alexandra Mejía Guzmán

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. Ricardo Alfonso Peñaranda Castro

Secretario General

Dr. José Luis Macías Rodríguez

Decano E. de la Facultad

Dra. Alexandra Mejía Guzmán

Director de Programa

Ing. Nubia Liliana Becerra Ospina

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
RESUMEN	13
INTRODUCCIÓN	14
OBJETIVOS	16
1. GENERALIDADES	17
1.1. Plásticos	17
<i>1.1.1. Bioplásticos</i>	<i>17</i>
1.2. Celulosa	18
<i>1.2.1. Estructura de la celulosa</i>	<i>19</i>
<i>1.2.2. Métodos de obtención de la celulosa</i>	<i>21</i>
<i>1.2.3. Derivados de la celulosa y su uso como bioplásticos</i>	<i>25</i>
<i>1.2.4. Degradación de la celulosa</i>	<i>28</i>
1.3. Matrices de selección	30
<i>1.3.1. Método multicriterio</i>	<i>30</i>
2. SELECCIÓN DE MÉTODO DE PRODUCCIÓN	34
2.1. Métodos de producción de biofilm con residuos de papel de oficina como materia prima	34
<i>2.1.1. Solución acuosa de ácido sulfúrico para la producción de biofilm</i>	<i>34</i>
<i>2.1.2. Producción de PHB usando celulosa como sustrato para la bacteria Burkholderia Sacchari</i>	<i>36</i>
<i>2.1.3. Producción de Acetato de Celulosa Plastificada</i>	<i>40</i>
2.2. Método Multicriterio Seleccionado	42
2.3. Selección de Criterios de Evaluación	43
<i>2.3.1. Costos</i>	<i>43</i>
<i>2.3.2. Factor Ambiental</i>	<i>43</i>
<i>2.3.3. Factibilidad</i>	<i>44</i>
<i>2.3.4. Rendimiento del Proceso</i>	<i>44</i>
<i>2.3.5. Seguridad del Proceso</i>	<i>44</i>
<i>2.3.6. Marco Legal</i>	<i>44</i>
<i>2.3.7. Propiedades físicoquímicas y mecánicas del biofilm obtenido</i>	<i>45</i>

2.4. Aplicación método multicriterio	45
2.4.1. <i>Asignación de pesos relativos a los criterios de evaluación</i>	45
2.4.2. <i>Comparación de criterios por pares</i>	46
2.4.3. <i>Desarrollo de la Matriz de Selección</i>	50
3. PROCESO DE PRODUCCIÓN DE BIOFILMS DE PHB (POLI-3-HIDROXIBURITATO) A PARTIR DE RESIDUOS DE PAPEL DE OFICINA	52
3.1. POLI-3-HIDROXIBURITATO (PHB)	52
3.1.1. <i>Síntesis de PHB</i>	52
3.1.2. <i>Extracción de PHB</i>	54
3.1.3. <i>Propiedades físicas</i>	55
3.1.4. <i>Aplicaciones</i>	57
3.2. Burkholderia sacchari	58
3.3. Descripción del proceso	59
3.3.1. <i>Preparación del Sustrato</i>	63
3.3.2. <i>Upstream y fermentación</i>	67
3.3.3. <i>Downstream o extracción de PHB</i>	69
3.3.4. <i>Transformación de PHB</i>	69
3.4. Propiedades fisicoquímicas y mecánicas típicas del biofilm	70
3.4.1. <i>Pureza y composición</i>	71
3.4.2. <i>Apariencia</i>	71
3.4.3. <i>Cristalinidad</i>	72
3.4.4. <i>Degradación térmica</i>	73
3.4.5. <i>Comportamiento de fusión</i>	74
3.4.6. <i>Propiedades mecánicas</i>	75
3.4.7. <i>Morfología de la superficie y rugosidad</i>	77
3.5. Comparación del Biofilm de PHB con algunos plásticos	79
3.5.1. <i>Polipropileno (PP)</i>	79
3.5.2. <i>Polietileno de baja densidad (PEBD)</i>	80
3.5.3. <i>Ácido Poliláctico (PLA)</i>	81
3.6. Usos del biofilm	82
3.7. Equipos	85

3.7.1. <i>SR-101: Trituradora</i>	85
3.7.2. <i>M-101, M-102: Mezcladores</i>	86
3.7.3. <i>DE-101: Secador</i>	87
3.7.4. <i>SR-102: Molino</i>	88
3.7.5. <i>R-102: Biorreactor</i>	89
3.7.6. <i>R-103, R-104, R-105: Biorreactor</i>	90
3.7.7. <i>FF-101, FF-102: Centrifuga</i>	91
3.7.8. <i>L-101: Filtro de membrana</i>	92
3.7.9. <i>DE-102 A/D: Placas de calentamiento</i>	93
3.7.10. <i>R-101, R-106, R-107: Biorreactor</i>	94
3.7.11. <i>M-103: Mezclador</i>	95
3.7.12. <i>M-104: Mezclador</i>	96
3.8. Condiciones de trabajo de equipos	97
3.9. Área de producción requerida	99
4. ANÁLISIS DE COSTOS	102
4.1. Equipos	102
4.2. Consumo energético	103
4.3. Materia prima	105
4.4. Área productiva	107
4.5. Personal operativo	108
4.6. Costos totales	112
5. CONCLUSIONES	113
BIBLIOGRAFÍA	120
ANEXOS	129

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Diagrama clasificación de los bioplásticos y ejemplos	18
Figura 2. Estructura molecular de la celulosa	20
Figura 3. Diagrama del proceso de destintado	24
Figura 4. Estructura molecular del acetato de celulosa	26
Figura 5. Estructura matriz de selección multicriterio	31
Figura 6. Mecanismo de síntesis de PHB	53
Figura 7. Árbol filogenético de la bacteria Burkholderia Sacchari	59
Figura 8. Diagrama de bloques BFD	61
Figura 9. Diagrama de proceso (PFD)	62
Figura 10. Gráfica concentración vs pH	65
Figura 11. Transmitancia vs Temperatura de procesamiento (A distintas longitudes de onda)	71
Figura 12. Imágenes estereomicroscópicas de las muestras finales de biofilm	72
Figura 13. Cristalinidad vs Temperatura de procesamiento	73
Figura 14. Determinación de temperatura de degradación inicial y completa	74
Figura 15. Curvas de fusión de muestras de PHB	75
Figura 16. Distintas propiedades mecánicas de muestras de biofilms de PHB	76
Figura 17. Escaneo microscópico del biofilm	77
Figura 18. Plástico usado para empacar elementos complementarios para dispositivos electrónicos	83
Figura 19. Productos empacados en plástico	84
Figura 20. Packaging primario en alimentos	84
Figura 21. Trituradora de papel DT200C	86
Figura 22. Mezclador de planta piloto	87
Figura 23. Secador de bandejas CT-C-O	88
Figura 24. Plastic crusher fabricado por Guangzhou Tyrone plastic machine co	89
Figura 25. Reactor F-1	90
Figura 26. Reactor de vidrio de laboratorio 1L-200L	91
Figura 27. Centrifugadora industrial automática PGZ	92
Figura 28. Filtro de bolsa YT-1D	93

Figura 29. Placa calefactora PLD-6018	94
Figura 30. Bioreactor KS	95
Figura 31. Tanque de mezclado de acero inoxidable	96
Figura 32. Mezclador de acero inoxidable enchaquetado de 30L	97

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Composición porcentual de diferentes tipos de fibras	19
Tabla 2. Influencia de la adición de plastificante en las propiedades mecánicas del acetato de celulosa	27
Tabla 3. Propiedades mecánicas del biofilm obtenido en “Concentrated sulfuric acid aqueous solution enables rapid recycling of cellulose from waste paper into antimicrobial packaging”	35
Tabla 4. Propiedades mecánicas de bioplástico plastificado con ftalato de dibutilo a diversas concentraciones	42
Tabla 5. Valores de calificación de criterios	45
Tabla 6. Comparación de criterios por pares	46
Tabla 7. Clasificación de criterios de evaluación según su peso relativo	48
Tabla 8. Escala de calificación para criterios de evaluación dentro de la matriz de selección	49
Tabla 9. Matriz de selección	50
Tabla 10. Algunas propiedades mecánicas del PHB medidas de acuerdo con estándares ASTM	57
Tabla 11. Aplicaciones de PHB según el área	57
Tabla 12. Comparación de composición de papel sin pretratamiento y pretratado	63
Tabla 13. Comportamiento del pH a la variación en la concentración de H ₂ O ₂	64
Tabla 14. Comportamiento del pH a una concentración de H ₂ O ₂ de 0,5%	65
Tabla 15. Resultados obtenidos en las pruebas realizadas en biofilms de PHB transformados por solvent casting con ácido acético	78
Tabla 16. Algunas propiedades del PHB y otros plásticos	82
Tabla 17. Equipos y condiciones de operación	98
Tabla 18. Área ocupada por equipo	99
Tabla 19. Ss, Sg y Se por equipo	101
Tabla 20. Costo por equipo	102
Tabla 21. Consumo y costo energético por equipo	104
Tabla 22. Calor relacionado al uso de secadores y placas de calentamiento	105
Tabla 23. Costo materia prima según cantidad requerida por lote	106
Tabla 24. Valor área productiva requerida	107
Tabla 25. Distribución de horarios por turno	108

Tabla 26. Valor del salario mínimo por hora	109
Tabla 27. Salario mensual por operario	110
Tabla 28. Vacaciones y prima mensual por operario	110
Tabla 29. Aporte a seguridad social	111
Tabla 30. Costo total por personal operativo	111
Tabla 31. Costo total de producción	112

LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Evaluación global de cada alternativa en el método de sumas ponderadas	33
Ecuación 2. Cálculo del peso relativo	46
Ecuación 3. Cálculo del flujo de aire necesario en un secador	66
Ecuación 4. Ecuación general de reacción bioquímica para un microorganismo aerobio	68
Ecuación 5. Ecuación de la reacción bioquímica de <i>B. sacchari</i>	69
Ecuación 6. Cálculo de la superficie estática (Ss)	100
Ecuación 7. Cálculo de la superficie gravitacional (Sg)	100
Ecuación 8. Cálculo de la superficie evolutiva (Se)	100
Ecuación 9. Cálculo coeficiente K	100
Ecuación 10. Cálculo consumo energético por equipo	103
Ecuación 11. Cálculo calor secadores y placas de calentamiento	105
Ecuación 12. Cálculo salario mensual personal turno S-D	109
Ecuación 13. Cálculo aporte total nómina	111

RESUMEN

Este proyecto tuvo como finalidad evaluar de manera conceptual la viabilidad técnica y costos para la producción de bioplástico en forma de película mediante el aprovechamiento de residuos de papel generados por la empresa International House Bogotá.

Para ello, en la primera fase de la investigación se llevó a cabo la búsqueda de distintas alternativas disponibles en bibliografía para el diseño del proceso y se determinaron criterios de decisión para aplicar una matriz de decisión formada por el método de sumas ponderadas. Los factores evaluados para cada caso fueron los costos, el componente ambiental, la factibilidad técnica, rendimiento, seguridad del proceso, marco legal y propiedades mecánicas del producto. Como resultado se obtuvo que el método más apropiado para la síntesis del biofilm es el de la producción de poli-3-hidroxibutirato (PHB) usando celulosa como sustrato para la bacteria *Burkholderia Sacchari*.

Gracias a lo reportado en investigaciones previas de otras instituciones, se continuó con la segunda fase, donde se estableció la producción de PHB mediante distintas operaciones que incluyen la preparación del sustrato por medio de la hidrólisis del papel, tren de inoculación de *B. sacchari*, fermentación, extracción y transformación del PHB. El balance de masa demostró que para producir 1,05kg/lote de biofilm se requieren 32,85kg de papel como materia prima. Las características obtenidas reportadas en la transformación del producto fueron comparadas con datos de otros plásticos con los que el PHB es usualmente relacionado. Dentro de estas propiedades se pueden destacar su pureza (98-99%), translucidez, punto de fusión (180°C), alargamiento a la rotura (9%), módulo de Young (1,2GPa) y esfuerzo de tracción (32MPa) [1].

Por último, se determinaron los costos requeridos para la instalación y puesta en marcha del proyecto, teniendo en cuenta el costo de la materia prima, de equipos, del área de producción y de mano de obra, obteniendo un valor de 473.362.448,20COP.

Palabras clave: Biofilm, papel, PHB, solvent casting, *Burkholderia sacchari*.

INTRODUCCIÓN

La industria de los plásticos es considerada una de las más importantes a nivel global, ya que estos son utilizados para la manufactura de diversos objetos y herramientas esenciales en la vida diaria. Entre 1950 y 2017, se fabricaron unos 9,2 mil millones de toneladas de plástico, esto es más de una tonelada por persona viva sobre la tierra en la actualidad [2]. Envases y empaques para alimentos, cubiertos, bolsas, muebles, implementos médicos, de aseo y de oficina, y un largo etcétera son algunos ejemplos de su amplio alcance.

Dado lo anterior, es evidente que para cumplir con la producción masiva es necesaria la implementación de una gran cantidad de materia prima, que sea económica y fácil de transformar, y es por esto que se utiliza, por lo general, los derivados del petróleo. Más del 90% de los plásticos producidos provienen de combustibles fósiles. La fabricación de todo tipo de plásticos representa aproximadamente el 6% del consumo mundial de petróleo, que es equivalente al del sector mundial de la aviación [3].

Sin embargo, su uso desmesurado se ha convertido en un problema ambiental y de salud pública, pues la mayoría de estos polímeros sintéticos no son biodegradables y muchos no son aptos para ser reciclados, por lo tanto, se consideran de un solo uso. El 56% del plástico total consumido en Colombia es de este tipo [3]. Esta problemática se exhibe también en el país al tomar en cuenta cifras como el consumo per cápita nacional (24kg/año), el hecho de que el 90% de las playas de la costa atlántica están contaminadas con microplástico [4] y que, además, entre los 20 ríos más contaminados del planeta con plástico figuran el Amazonas, en el puesto 7, y el Magdalena, la arteria fluvial del país, en el 15 [3].

Si la situación continúa con esta dinámica, se estima que para el año 2050 el consumo de plástico se cuadruplicará (para 2020 se estimó un consumo mundial de 900 millones de toneladas) y habrá 12 mil millones de toneladas de desechos de este tipo alojados en entornos naturales, principalmente en el lecho marino de los océanos [3]. Además, de acuerdo a lo presentado en un estudio del Foro Económico Mundial de 2019, en la Tierra, para el año 2050, el peso de los residuos plásticos en el mar será superior al peso de todos los peces del planeta, lo que equivaldría a verter la carga de 4 camiones de gran tonelaje al mar cada minuto [5].

Para combatir las consecuencias negativas de la producción y el uso excesivo del plástico se han propuesto diferentes medidas de contención, una de ellas es la continua investigación de

materiales alternativos que puedan ser capaces de reemplazar los plásticos convencionales derivados del petróleo, estos primeros son denominados bioplásticos, polímeros fabricados a partir de fibras naturales como la pectina, almidón, celulosa, quitosano, colágeno, proteína de soya, entre otros [6], que dada su naturaleza orgánica son fácilmente biodegradables, reciclables y también pueden ser aprovechados como compostaje.

Debido a la amplia gama de materias primas y procesos para su transformación y obtención de bioplásticos, este estudio se enfoca en evaluar la viabilidad del uso de una de ellas, los residuos de papel de oficina producidos por la empresa International House Bogotá, comparando tres posibilidades distintas de aprovechamiento, las cuales son el uso de una solución acuosa de ácido sulfúrico para formación de biofilms de celulosa, la producción de poli-3-hidroxi-butirato (PHB) usando los residuos de papel como sustrato para la bacteria *Burkholderia sacchari* y la acetilación y plastificación de la celulosa. Estas alternativas fueron evaluadas y comparadas entre sí gracias a criterios definidos en una matriz de decisión y a la revisión bibliográfica de cada una, seleccionando la de mayor ajuste según dicha matriz. Posteriormente, se estableció el proceso de producción de biofilms a nivel conceptual y se expusieron algunas propiedades físicas y mecánicas obtenidas en el producto en línea con lo reportado en distintos referentes, estas fueron comparadas con datos de otros plásticos conocidos para disponer los usos y aplicaciones, y, por último, se realizó el análisis de los costos relacionados al proceso de producción.

OBJETIVOS

Objetivo General

Evaluar la viabilidad técnica y los costos de la producción de biofilm aprovechando los residuos de papel de oficina generados por la empresa International House Bogotá.

Objetivos Específicos

Definir los criterios de decisión para el diseño conceptual del proceso de producción de biofilm mediante la revisión bibliográfica.

Establecer a nivel conceptual el proceso de producción de biofilm para el aprovechamiento de los residuos de papel de oficina generados por la empresa International House Bogotá.

Realizar un análisis de los costos relacionados con el proceso de producción de biofilm.

1. GENERALIDADES

A continuación, se describen distintos conceptos relacionados con el objeto de la investigación, estos son necesarios para el desarrollo, comprensión e interpretación de la misma.

1.1. Plásticos

Los plásticos son materiales constituidos por uno o varios polímeros, que son macromoléculas formadas por unidades repetitivas más pequeñas llamadas monómeros. Estos materiales tienen la propiedad de poder ser moldeados en objetos sólidos de innumerables formas, lo que les confiere diversas aplicaciones[7]. Cabe resaltar que, en la actualidad, son fabricados principalmente a partir de compuestos orgánicos derivados del petróleo.

1.1.1. Bioplásticos

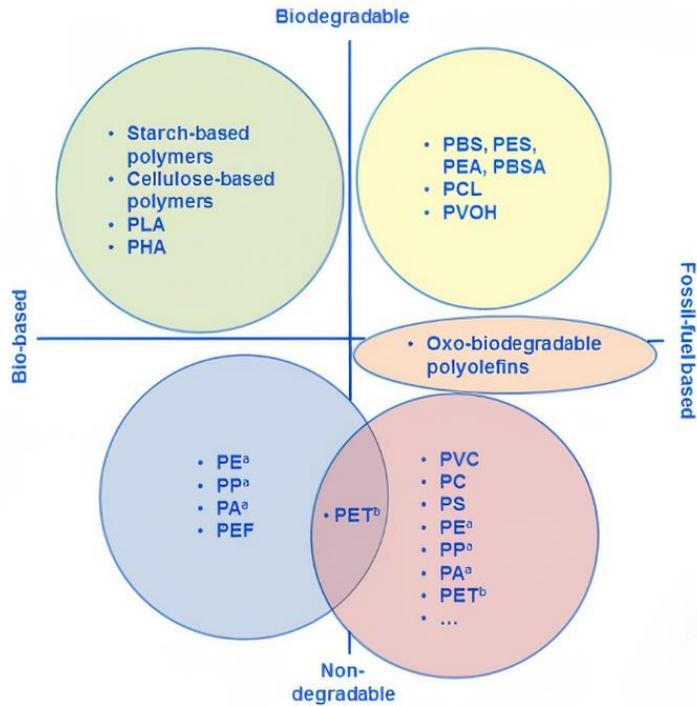
Dentro de los plásticos existen los llamados bioplásticos, los cuales se refieren a los que son biobasados, es decir, obtenidos total o parcialmente de biomasa, ya sea vegetal, animal o producida por un microorganismo; y/o son biodegradables, o sea, capaces de descomponerse en otros compuestos como agua y dióxido de carbono gracias a la acción de agentes biológicos.

Si los plásticos biodegradables se degradan de conformidad con las normas que regulan la compostabilidad, como la norma europea EN 13432, pueden ser etiquetados como compostables [8]. Es necesario hacer énfasis en la diferencia entre biodegradabilidad y compostabilidad, este segundo término se refiere a la formación de compost, un humus obtenido artificialmente por descomposición bioquímica de residuos orgánicos [9], y que contiene ciertos componentes orgánicos que pueden ser aprovechables para plantas y cultivos, por lo tanto puede ser usado como abono orgánico.

Los bioplásticos basados en celulosa o almidón, el ácido poliláctico (PLA) y los polihidroxicanoatos, son ejemplos de bioplásticos constituidos por polímeros naturales y además biodegradables. Por otra parte, existen los que, a pesar de ser derivados del petróleo, también pueden ser descompuestos por agentes naturales, como el succinato de polibutileno (PBS) o la polietersulfona (PES) [8]. Ejemplos de cada caso son mostrados en la **Figura 1.** a continuación.

Figura 1.

Diagrama clasificación de los bioplásticos y ejemplos.



Nota. La imagen expone la clasificación general de los bioplásticos y algunos ejemplos de cada caso. Tomado de: [8] Charlotte Wagner, “Bioplastics Types, applications, toxicity and regulation of bioplastics used in food contact materials,” 2014. [Online]. Available: <https://www.foodpackagingforum.org/food-packaging-health/bioplastics>.

1.2. Celulosa

La celulosa es uno de los materiales orgánicos más abundantes en la tierra que se caracteriza por su gran disponibilidad, es una fibra vegetal, fuente de glucosa y componente principal de las paredes celulares de diversidad de plantas, cuya longitud y espesor varía según el tipo de fuente de la que es obtenida. Este componente se encuentra en las frutas, las hortalizas, cereales e incluso es producida por ciertos microorganismos, además, es parte de la fibra cruda (en donde no es aprovechada realmente), y se encuentra en el arroz, el maíz y en el trigo, localizándose en el germen y en el pericarpio junto con la lignina y hemicelulosa, representando entre un 1-2% del grano [10]. A continuación, se presenta la **Tabla 1.**, que expone el contenido de celulosa en diferentes clases de fibras:

Tabla 1.*Composición porcentual de diferentes tipos de fibras.*

Tipo de fibra	Celulosa (%)	Lignina (%)	Hemicelulosas (Pentosas) (%)	Cenizas (%)	Sílice (%)
Fibra de pajas					
Arroz	28-36	12-16	23-28	15-20	9-14
Trigo	29-35	16-21	27 (26-32)	4,5-9	3-7
Avena	31-37	16-19	27-38	6-8	4-6,5
Centeno	33-35	16-19	27-30	2-5	0,5-4
Fibras de caña					
Azúcar	32-44	19-24	22 (27-32)	1,5-5	0,7-3,5
Bambú	26-43	21-31	15 (15-26)	1,7-5	0,7
Fibras de					
Esparto	33-38	17-19	27-32	6-8	-
Hierba elefante	22	23,9	24	6	-
Fibras de tallos	44,75	22,8	20 (20)	3	2
Fibras					
Lino	43-47	21-23	16 (24-26)	5	-
Kenaf	31-39	15-19	19 (22-23)	2-5	-
Yute	45-53	21-26	15 (18-21)	0,5-2	-
Fibras de hojas					
Abacá	60,8	8,8	20 (15-17)	1,1	-
Sisal	43-56	7-9	12 (21-24)	0,6-1	-
Henequén	77,6	13,1	4-8	-	-
Fibras de grano					
Linters de	80-85	-	1-3	0,8-2	-

Nota. La anterior tabla resume la composición porcentual de diferentes tipos de fibras, se evalúa su composición respecto a diferentes sustancias que usualmente las componen como Celulosa, Lignina, Hemicelulosa, Cenizas y Sílice. Tomado de: [11] J. J. Locane, "II. Fundamentos," Miradas locales en tiempos Glob., pp. 23-96, 2019, doi: 10.31819/9783954878840-003. [Online]. Available: <https://www.coursehero.com/file/63904461/leerpdf/>.

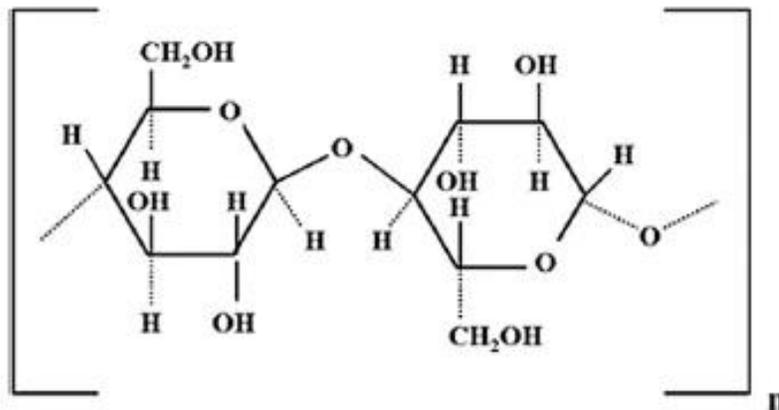
1.2.1. Estructura de la celulosa

Este material, de fórmula $C_6H_{10}O_5$, tiene una estructura lineal o fibrosa con presencia de múltiples puentes de hidrógeno entre los grupos hidroxilo de distintas cadenas yuxtapuestas de glucosa, lo que la hace altamente resistente e insoluble al agua [10], además, debido al espacio regular que existe entre los grupos hidroxilos de la molécula, particularmente en las zonas cristalinas, se facilita la formación de enlaces de hidrógeno, lo que explica por qué aunque la

celulosa pueda tener características higroscópicas los enlaces intermoleculares son muy fuertes para permitir la solución [12]. Está constituida por una larga cadena de carbohidratos polisacáridos, lo que permite que se originen fibras compactas que constituyen la pared celular aportando la rigidez necesaria [10]. La cadena de celulosa es alargada y las unidades de glucosa están dispuestas en un solo plano debido a la presencia del anillo glicosídico y a su conformación. La configuración más estable es en forma de silla con los grupos hidroxilos en posición ecuatorial [11]. En la **Figura 2.**, se puede observar la configuración estructural de una pequeña sección del polímero (monómero).

Figura 2.

Estructura molecular de la celulosa.



Nota. La figura representa la estructura molecular general de la celulosa. Tomado de: [6] T. Saha, M. E. Hoque, and T. Mahbub, “Biopolymers for Sustainable Packaging in Food, Cosmetics, and Pharmaceuticals,” *Adv. Process. Prop. Appl. Starch Other Bio-Based Polym.*, pp. 197–214, 2020, doi: 10.1016/b978-0-12-819661-8.00013-5 [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/343357671_Biopolymers_for_Sustainable_Packaging_in_Food_Cosmetics_and_Pharmaceuticals.

El grado de polimerización depende del tipo de celulosa que sea objeto de estudio, sin embargo, este parámetro puede variar desde las 15000 unidades para fibras de algodón hasta valores aproximados de 50 para celulosas microcristalinas. En cuanto a su cristalinidad, las cadenas lineales de celulosa se asocian en subunidades de 3x4nm que se encuentran a su vez unidos por enlaces de hidrógeno formando microfibrillas con un espesor de aproximadamente 25nm. Estas

fibrillas contienen secuencias alternadas de zonas con estructura cristalina y zonas amorfas, los núcleos de la parte cristalina denominadas cristalitas, presentan una elevada resistencia química a las reacciones de hidrólisis por lo que el ritmo en el cual se desarrollan puede variar según la zona que está siendo tratada [11].

1.2.2. Métodos de obtención de la celulosa

Debido a que el punto de fusión de la celulosa es mayor a su temperatura de degradación, su disolución es la única vía factible para su aplicación en diferentes formas utilizables. Su obtención por medio de una disolución confiere una alta pureza, uniformidad y reproductibilidad de propiedades, en comparación a la implementación de fibras naturales como el algodón [13]. Entre las principales propiedades fisicoquímicas de la celulosa se encuentran el índice o grado de polimerización, la cristalinidad y la porosidad.

Con el fin de elaborar pulpas celulósicas es necesaria la separación de la lignina del resto de carbohidratos de la madera, esto se logra mediante la deslignificación, que tradicionalmente se lleva a cabo por la solubilización de la lignina y separación de las fibras. A gran escala los procesos comerciales de deslignificación se basan en procedimientos que inducen a la lignina a hacerse soluble en medios acuosos y, debido a que la lignina es insoluble en agua, se emplean mayormente ácidos o álcalis que incrementan las propiedades hidrofílicas de estos componentes [11].

El proceso de obtención de una suspensión de fibras en agua consta de:

- Pretratamiento de la materia prima: mediante el lavado de troncos, corte, descortezado y astillado.
- Obtención de la pasta: a partir de métodos químicos, mecánicos y químico-mecánicos.
- Lavado: eliminando sustancias disueltas.
- Depuración y acondicionamiento: se tratan las fibras con el fin de separar sustancias extrañas y de modificarlas para que tengan un tamaño y espesor adecuado para las posteriores transformaciones.

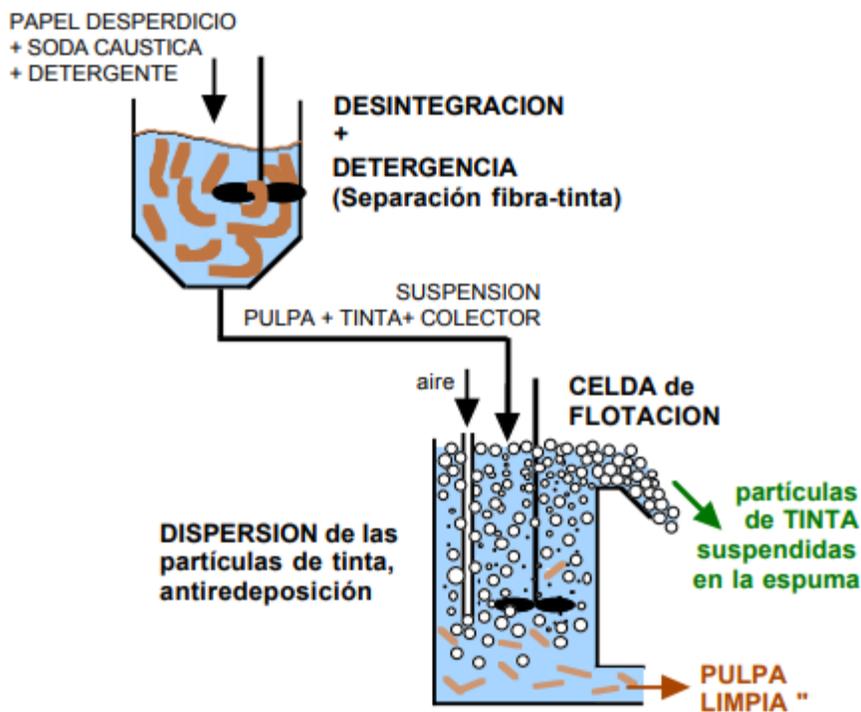
- Blanqueo: se elimina por completo todos los componentes coloreados de la pasta por la lignina.

1.2.2.i. Obtención por Métodos Químicos. Bajo método de obtención de pastas químicas, las fibras se blanquean de forma eficiente, son de mayor calidad y más resistentes. La deslignificación se lleva a cabo con la ayuda de sustancias químicas, ya sean agentes ácidos o básicos, además, se realiza en digestores o reactores bajo condiciones de temperatura y presión. Al utilizar un método ácido se logra una mejor separación de celulosa y posteriormente es posible obtener papeles de buena calidad, sin embargo, estas sustancias imposibilitan el implementar maderas resinosas, ya que junto a valores de PH muy bajos pueden formarse complejos insolubles y coloreados que manchan la pasta, caso contrario a lo ocurrido al utilizar agentes alcalinos, ya que estas sustancias se eliminan en las lejías residuales en forma de fenolatos y sales solubles [11]. Entre los procesos de obtención de pastas celulósicas por medio químico, el más reconocido es el método Kraft o al sulfato y el proceso de la sosa, siendo el proceso Kraft el proceso de fabricación de papel más importante y extendido hasta la fecha ya que en la actualidad aproximadamente la mitad de pasta es fabricada mediante este método. El rendimiento de este proceso oscila entre un 40 y 60 %, requiere de tiempos de cocción bajos y es un procedimiento poco selectivo en cuanto a la materia prima implementada. En el pulpeo se utiliza una mezcla de NaOH y Na₂S, el sulfuro acelera la reacción formando como resultado de la reducción de sulfato de sodio el álcali perdido durante el proceso obteniendo como producto final una pulpa de alta resistencia [11].

1.2.2.ii. Proceso de Destintado. Con el fin de obtener productos como films, y en caso de que la materia prima provenga de tareas de reciclaje como lo es el papel periódico, cartón o el papel de oficina, es necesario que este pase por un procedimiento de blanqueamiento o de destintado previo a su transformación en películas de bioplástico. El proceso de destintado es un procedimiento complejo que involucra fenómenos interfaciales, se trata de una secuencia de operaciones que permite retirar mayoritariamente las tintas del papel reciclado para que sea posible renovar su vida útil. Como se muestra a continuación en la imagen presentada (**Figura 3.**), la primera operación se conoce como desintegración, la cual consiste en realizar agitación mecánica del papel reciclado suspendido en una solución cáustica y detergente; durante esta primera fase se puede observar dispersión mecánica del conglomerado de fibras y partículas de tintas, hinchamiento de las fibras de celulosa, humectación de la interfase fibra-tinta, la emulsión de las resinas y aceites saponificables que puedan estar presentes en las tintas, el despegue del contacto fibra-tinta y finalmente una acción dispersante que evita la redeposición de partículas de tinta [14]. A continuación, se realiza proceso de flotación que consiste en inyectar burbujas de aire y dejar que estas colecten partículas de tinta, pero no las fibras. En el transcurso de este procedimiento se pueden identificar fenómenos comunes como hidrofobación de las partículas de tinta, hidrofiliación de las fibras de celulosa y generación de espuma [14].

Figura 3.

Diagrama del proceso de destintado.



Nota. La anterior figura es la representación gráfica del proceso de destintado. Tomado de: [14] Orlando ROJAS y Johnny BULLON, “Fenómenos interfaciales en el destintado del papel desperdicio,” LAB.FIRP, vol. 3, 2007, [Online]. Available: <https://es.firp-ula.org/s847a-fenomenos-interfaciales-en-el-destintado-del-papel-desperdicio/>.

Esta metodología tradicional para el tratamiento del material reciclado puede variar gracias a la gran diversidad de agentes que se utilizan para el llamado “blanqueado”, etapa siguiente a la flotación en la que se añade un reactivo de blanqueo o una mezcla de estos a un tanque en el cual con un tiempo de residencia relativamente alto se favorece la eliminación de tintas residuales; según el artículo de revisión “Métodos utilizados en el destintado de papel desperdicio—aproximación al estado del arte” el proceso de blanqueamiento puede ser tanto oxidativo como reductivo teniendo entre los productos oxidativos más comunes el peróxido de hidrógeno, hidróxido sódico, silicato de sodio y algunos agentes quelantes, mientras que el agente reductivo más utilizados para esta fase de la recuperación de tintas es el hidrosulfito sódico [15].

Propiedades finales deseables del producto fabricado usando la celulosa como materia prima tales como el brillo, transparencia y sus posibles aplicaciones, pueden verse afectadas por la

presencia de tintas en él. Como se menciona en “Separation of Ink particles from waste paper by fine bubbles” y en “destintado de papel de impresión láser aplicando secuencias con ultrasonido de acción intensiva y procesamiento magnético-mecánico, orientado hacia la obtención de celulosa de alta pureza” el brillo y calidad del producto final depende directamente del nivel de blanqueo al cual se vea sometido el material reciclado, esto se debe a que en la actualidad las formulaciones de tintas han evolucionado, aumentando su complejidad al incrementar el uso de resinas y plastificantes en su composición [16]. Algunos papeles con tintas pueden ser difíciles de destintarse, siendo la causa de bajos niveles de blancura, también, algunos tipos de tinta como la de tóner tienden a provocar puntos negros en las pulpas por lo que la fibra secundaria presente ciertos problemas para su aprovechamiento [17].

Estos problemas se derivan de los productos químicos involucrados en el proceso de la impresión, las cargas superficiales, así como los sistemas de recolección en los basureros y por la presencia de materiales ocultos que pueden afectar la calidad de la fibra secundaria. Además, la importancia de un pretratamiento radica en que, al no eliminarse por completo las tintas del material primario, sustancias como el plomo y el cromo (presentes en variedad de tintas) pueden encontrarse en altas concentraciones en el biofilm producido, lo que limitaría o directamente impediría su uso en aplicaciones que involucren contacto con alimentos y otras en las que exista un contacto directo con el usuario.

1.2.3. Derivados de la celulosa y su uso como bioplásticos

Como ya se mencionó con anterioridad, para que la celulosa sea altamente aprovechable debe obtenerse a partir de ella derivados mediante su disolución. Por ejemplo, es común el obtener éteres y ésteres con el tratamiento de esta, sometiendo la pulpa celulósica a nitraciones o acetilaciones con el fin de obtener una sustancia derivada que sea posible implementar en un proceso de producción para diferentes productos, en cuanto a los ésteres, resaltan en este grupo el nitrato y el acetato de celulosa [12].

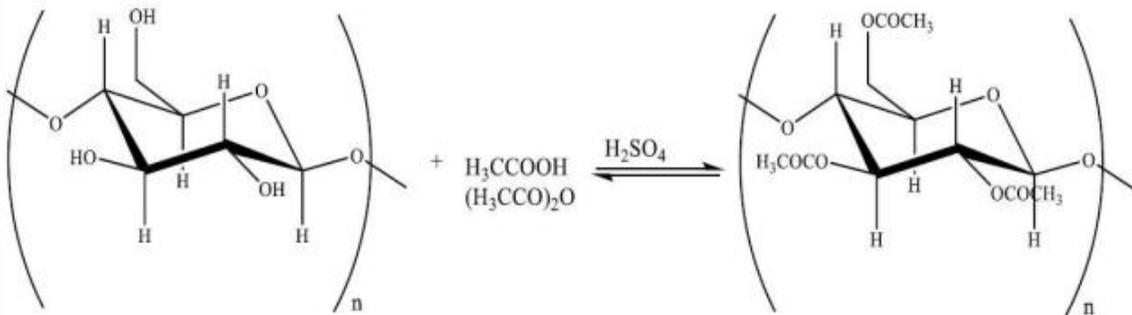
1.2.3.i. Acetato de Celulosa. El acetato de celulosa resulta de la manipulación de la materia celulósica junto con anhídrido acético o ácido acético en presencia de catalizadores como el ácido sulfúrico, fosfórico o clorhídrico como se muestra en la **Figura 4**. Es un polímero termoplástico, relativamente duro y brillante, incoloro transparente y amorfo, posee una buena claridad y alta estabilidad ante rayos UV, de igual forma, se caracteriza por tener resistencia química moderada y un pobre comportamiento como aislante térmico, además de una gran capacidad de absorción, lo que puede acarrear dificultades ante los cambios dimensionales [18]. Respecto a sus propiedades mecánicas, estas dependen de tres factores principales que son la longitud de la cadena de la molécula de celulosa, el grado de acetilación y el tipo y cantidad de plastificante [12], este último se ve evidenciado en la

2.2.3.i.

3.2.3.i. **Tabla 2.** Este material ha sido ampliamente usado en la manufactura de films, compuestos de moldeo y extrusión, fibras y lacas [12].

Figura 4.

Estructura molecular del acetato de celulosa.



Nota. La figura representa la estructura molecular general del acetato de celulosa. Tomado de: [18] K. Stefanny and C. Gonzalez, “Obtención de acetato de celulosa a partir de papel reciclado : una alternativa para la producción de acetato de celulosa en Colombia Obtaining cellulose acetate from recycled paper : an alternative for the production of cellulose acetate in Colombia,” ConBRepro, pp. 1–9, 2020, [Online]. Available: https://aprepro.org.br/conbrepro/2020/anais/arquivos/09272020_190956_5f7113cc9b181.pdf.

Tabla 2.*Influencia de la adición de plastificante en las propiedades mecánicas del acetato de celulosa.*

Contenido de plastificante	25%	27%	29%	33%	Prueba ASTM
Gravedad específica	1,28	1,28	1,27	1,27	D792
Límite elástico (MPa)	37,2	33,1	29,6	26,2	D638
Elongación de ruptura (%)	25	25	30	30	D638
Módulo de flexión (GPa)	2,34	2,14	1,93	1,65	D790
Dureza Rockwell (Escala R)	90	82	71	59	D785
Impacto Izod con muescas (J/m)					D256
A 23°C	160	187	203	219	
A -40°C	48	48	53	53	
Temperatura de reblandecimiento Vicat (°C)*	113	109	105	100	D1525
Absorción de agua en inmersión por 24h (%)	2,3	2,3	2,3	2,3	D570
Acondicionado por 4h y 70°C					

Nota. La tabla presenta los valores en distintas propiedades mecánicas obtenidas en el acetato de celulosa al poseer distintos porcentajes de plastificante. Tomado de: [12] M. Gilbert, Chapter 22 - Cellulose Plastics, Eighth Edi. Elsevier Ltd, 2017. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-323-35824-8.00022-0>.

Según la información presentada en la **Tabla 2.**, menores cantidades de plastificante producen una superficie más dura, mayor resistencia al calor, mayor rigidez, mayor resistencia a la rotura, y mejor estabilidad dimensional. Mayor contenido de plastificante incrementa la resistencia al impacto [12]. Finalmente, la gravedad específica, y, por ende, la densidad, no tiene variaciones significativas, al igual que el porcentaje de absorción de agua.

1.2.3.ii. Nitrato de Celulosa: Otro ejemplo de derivados de celulosa útiles como materiales plásticos es el nitrato de celulosa, obtenidos al hacer reaccionar la celulosa con una mezcla de ácido nítrico acompañado de ácido sulfúrico y agua que cumplen la función de control del grado de sustitución y el grado de polimerización (características deseables del producto final). Igualmente, dentro del proceso de nitración es usual utilizar tanto pentóxido de fósforo como anhídrido acético para aumentar el contenido final de nitrógeno en el derivado celulósico. Estos compuestos tienen como aplicación principal las pelotas de tenis de mesa [12]. Sin embargo, dada su inflamabilidad (también es usada en dinamita y pólvora sin humo con un porcentaje de nitración mayor a 12% [19]) y su envejecimiento, el acetato de celulosa es preferido [12].

1.2.3.iii. Celulosa Microcristalina: La celulosa microcristalina, también denominada MCC es una variedad despolimerizada obtenida a partir de una hidrólisis ácida controlada del material celulósico extraído directamente de la madera. El ácido entra en contacto con las partes amorfas del material, dejando intactas aquellas zonas cristalinas y al mismo tiempo liberando pequeños paquetes de fibras de microcelulosa, lo cual hace que el producto final carezca de fibrocidad y posea una alta capacidad de absorción de agua. Existen dos tipos de celulosa microcristalina, MCC en polvo, que es implementado principalmente como transportador de aromas y como agente para evitar el endurecimiento del queso rallado y el MCC coloidal, que es ampliamente utilizado en la estabilización de espumas y emulsiones a alta temperatura, además este último es implementado de forma frecuente en la formación de geles y en la estabilización de estos mismos, así como para reemplazar grasas y aceites [10].

1.2.4. Degradación de la celulosa

Este proceso sucede por medio de la hidrólisis química y enzimática (biológica), principalmente por esta última, que involucra la acción de 3 enzimas: la exo β -1,4 celobiohidrolasa, la endo β -1,4 glucanasa (β -1,4 glucano glucanohidrolasa) y la β -1,4 glucosidasa [20].

1.2.4.i. Microorganismos Celulolíticos. La celulosa también puede ser utilizada como sustrato para el crecimiento de distintos microorganismos como bacterias y hongos, de la cual obtienen la energía necesaria para su reproducción al realizar la hidrólisis enzimática.

El mecanismo de reacción cambia según se trate de un microorganismo aerobio o anaerobio; estos primeros cuentan con un sistema de celulasas no complejo, lo cual conlleva a la secreción de enzimas hidrolíticas de celulosa en el medio de cultivo; por otra parte, las bacterias y hongos anaeróbicos contienen un sistema de celulasas que forman un complejo donde las enzimas que degradan la celulosa están contenidas en una membrana llamada celulososoma. Esta fundamental diferencia tiene implicaciones en el uso biotecnológico de estos microorganismos, pues las basadas en bacterias y hongos anaerobios pueden tener ventajas sobre los sistemas aeróbicos en términos de eficiencia hidrolítica [20]. Lo anterior, dado que los sistemas aeróbicos requieren agitación y aireación continua, estos pueden generar la pérdida de las enzimas secretadas y de los intermediarios de la degradación afectando la eficiencia del proceso. Estas condiciones de operación no son requeridas por los sistemas anaeróbicos, lo cual sumado a la alta eficiencia de la maquinaria hidrolítica sobre la celulosa hacen más atractivo este método [20].

Los microorganismos degradadores de celulosa incluyen bacterias y hongos, aerobios y anaerobios, termófilos y mesófilos que ocupan diversos hábitats; entre los hongos celulolíticos se destacan: *Phanerochaete chrysosporium*, *Fusarium solani*, *Trichoderma koningii*, *Trichoderma reesei*, *Penicillium funiculosum*, *Sporotrix sp.*, *Helotium sp.*, *Alternaria sp.*, *Geotrichum sp.*, *Rhizoctonia sp.*, *Trametes sp.*, *Paecilomyces sp.*, *Mucor sp.*, *Cladosporium sp.*, *Bulgaria sp.*, *Chaetomium sp.*, *Aspergillus sp.* [21]. Las bacterias celulolíticas más abundantes y conocidas son las aerobias dentro de las cuales se pueden citar: *Cytophaga sp.*, *Vibrio sp.*, *Bacillus sp.*, *Cellulomonas sp.*, *Pseudomonas sp.*, *Thermobifida sp.* Además se encuentran algunos anaerobios como: *Acetivibrio cellulolyticus*, *Butirivibrio sp.*, *Bacteroides cellulosolvens*, *Bacteroides succinogenes*, *Clostridium cellulovorans*, *Clostridium thermocellum*, *Ruminococcus albus* [20].

Estos microbios se pueden encontrar principalmente en hábitats donde exista una alta disponibilidad de celulosa, por ejemplo, en suelos de cultivos, residuos y compostajes vegetales como el bagazo de caña, bosques, páramos, etc. Sin embargo, es importante destacar la gran presencia, que también puede ser aprovechada, de bacterias y hongos en la microbiota del sistema digestivo de los animales rumiantes, el cual es un entorno favorable para su crecimiento, ya que es un ambiente anaerobio y con un suministro suficiente de sustrato. Ejemplos de las bacterias del

rumen son *Fibrobacter succinogenes*, *Butyrivibrio fibrisolvens*, *Ruminococcus albus*, *Clostridium Lochheadii*, *Ruminococcus flavefaciens*, y *Clostridium polysaccharolyticum* [22], algunas de las cuales ya fueron nombradas anteriormente.

Los microorganismos celulolíticos pueden ser usados en la producción de enzimas específicas que son requeridas a su vez en distintas industrias, farmacéuticos (principalmente en el caso de los hongos), la biodegradación de residuos orgánicos y distintos tipos de plástico, y la producción de bioplásticos gracias al uso de sus metabolitos.

1.3. Matrices de selección

Es un gráfico que permite la identificación y el análisis de la tasa de fuerza de las relaciones entre conjuntos de información. Debe ser utilizada durante el proceso de planeación y selección de un producto o servicio, teniendo en cuenta sus características deseadas y comparando las alternativas y variantes más significativas en el desarrollo del proyecto [23].

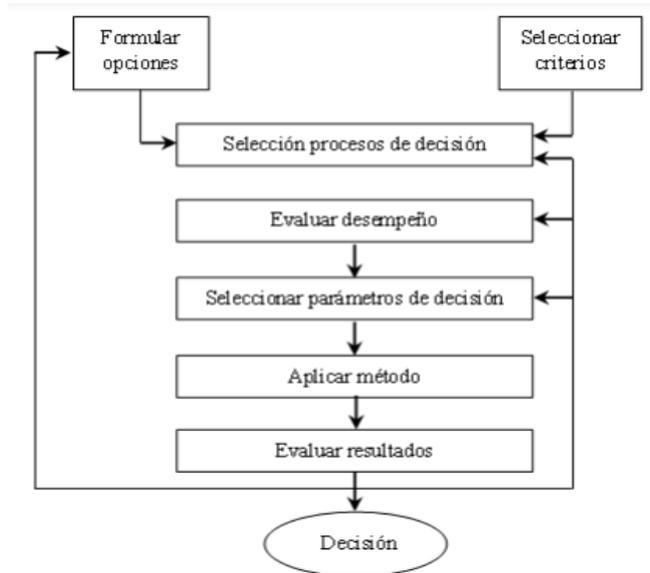
Teniendo en cuenta que la decisión final debe evaluar un conjunto de diferentes variables, se opta por implementar un método multicriterio por encima de los basados en uno solo de ellos, ya que es de gran beneficio en las evaluaciones e investigaciones diseñadas a nivel científico.

1.3.1. Método multicriterio

Bajo la implementación del método multicriterio se esclarecen aquellas incertidumbres que pueden nacer a raíz de implementar una opinión autocrítica como forma de toma de decisiones, ya que permite analizar los diversos objetivos o criterios presentados de forma simultánea que deben incorporarse y requieren de la aplicación de una metodología que implica la selección entre un conjunto de alternativas factibles, la optimización de varias alternativas de objetivo, y procedimientos de evaluación que sean racionales y consistentes[24], como puede observarse en la **Figura 5**.

Figura 5.

Estructura matriz de selección multicriterio.



Nota. La figura presenta la estructura de los métodos de selección multicriterio usando matrices de selección. Tomado de: [24] A. Grajales, E. Serrano, and C. Hahn, “Los métodos del proceso multicriterio para la evaluación,” no. 36, pp. 285–306, 2013, [Online]. Available: <http://www.scielo.org.co/pdf/luaz/n36/n36a14.pdf>.

Dentro de esta categoría denominada métodos de selección multicriterio es posible encontrar los siguientes ejemplos:

1.3.1.i. Método de PUGH. Se trata de un proceso sistemático de selección que identifica la mejor alternativa de diseño que integra todos los posibles criterios de evaluación implicados y relevantes para el desarrollo del proceso. Con el fin de realizar dicha selección es necesario especificar dichos criterios, asignándoles una importancia relativa y comparar alternativas en cada criterio. De esta forma el resultado final será una valoración ponderada de todas las alternativas estudiadas [25]. Esta matriz se realiza posicionando los criterios en la primera columna, para luego realizar el estudio comparativo entre las distintas alternativas de diseño, designando un criterio como base, siendo su puntuación en todos los campos la misma y en función a este criterio se va asignando un valor de +1, -1 o 0 dependiendo si el criterio cumple de forma superior, inferior o de la misma forma al criterio base [32], finalmente se realiza la suma de cada una de las columnas de criterios con el fin de seleccionar la de mayor valor debido a que esta será la mejor alternativa.

1.3.1.ii. Método TOPSIS. Conocida como técnica de ordenación de preferencias por similitud a la solución ideal o abreviadamente como TOPSIS es un método de análisis de decisión multicriterio basado en el concepto del ideal y del anti-ideal en la elección de alternativas, ya que bajo esta metodología las alternativas elegidas deben tener la distancia geométrica más corta de la solución ideal y la más larga respecto a la anti-ideal. Bajo este principio la solución ideal se define entonces como un conjunto de niveles o puntuaciones ideales respecto a los atributos o criterios analizados en un determinado problema, incluso si la situación o alternativa ideal resulta imposible o no factible de obtener [26].

1.3.1.iii. Método ELECTRE. Método perteneciente a la familia de métodos de relaciones de superación que es altamente utilizado por la importancia que tiene al considerar criterios verdaderos. Bajo esta técnica se organizan las alternativas identificadas de la mejor a la peor opción tomando en cuenta las preferencias de la persona a cargo de la decisión, teniendo en cuenta a concordancia que cuantifica hasta qué punto la opción A es mejor que la opción B y la discordancia que cuantifica hasta qué punto no existen atributos para que B sea mejor que A basándose en los criterios relevantes [27]. La comparación entre las alternativas se realiza por pares y con respecto a cada uno de los criterios de decisión seleccionados, y establece el grado de dominancia que una alternativa tiene sobre otra, a este grado de dominancia se le denomina “grado de superación” y es establecido mediante relaciones matemáticas [26].

1.3.1.iv. Método de Sumas Ponderadas. Este método parte de la matriz de posibles soluciones y consiste en la determinación de una evaluación global de cada alternativa estudiada para luego comparar los resultados obtenidos y escoger aquella alternativa con mejor puntaje. Para llevar a cabo el método, se deben multiplicar los desempeños de la alternativa α respecto a cada uno de los criterios y se multiplican por su respectivo peso asignado por el decisor, el cual debe tener en cuenta que la suma de todos los pesos normalizados asignados debe ser igual a 1. A continuación y con ayuda de la **Ecuación 1.**, se determina la evaluación global de cada alternativa, sumando los resultados de la multiplicación anterior entre sí, teniendo en cuenta el sentido de preferencia de cada uno de los criterios seleccionados, repitiendo el mismo procedimiento con cada una de las alternativas presentadas [28].

Ecuación 1.

Evaluación global de cada alternativa en el método de sumas ponderadas.

$$U(a) = \sum_{j=1}^n g_j(a) \times w_j$$

Nota. La ecuación 1 se usa para calcular la calificación global para las distintas alternativas presentes en una matriz de decisión evaluada por medio del método de sumas ponderadas. Tomado de: [28] S. L. Galarza Molina, A. Torres, S. M. Fajardo, and B. C. Pérez muzuzu, “Herramienta de análisis multi-criterio como soporte para el diseño del programa social de la facultad de ingeniería,” *Sci. Direct*, vol. 27, no. 121, pp. 175–194, 2011, doi: 10.1016/s0123-5923(11)70187-5. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0123592311701875>.

2. SELECCIÓN DE MÉTODO DE PRODUCCIÓN

2.1. Métodos de producción de biofilm con residuos de papel de oficina como materia prima

A continuación se describen distintos métodos de producción de bioplástico y biofilms consultados durante la revisión bibliográfica [29]- [30], cada uno de ellos muestra una alternativa sobre cómo pueden aprovecharse los residuos de papel impreso convencional, principalmente producido en el ejercicio de las labores de empresas administrativas o instituciones educativas. Estas investigaciones [29]- [30] previas muestran resultados satisfactorios en el uso de este residuo obteniendo nuevos productos que, además, también contribuyen en la solución de la problemática de la sobreproducción global de desechos plásticos.

2.1.1. *Solución acuosa de ácido sulfúrico para la producción de biofilm*

De acuerdo con los autores de “Concentrated sulfuric acid aqueous solution enables rapid recycling of cellulose from waste paper into antimicrobial packaging”, la solución acuosa de ácido sulfúrico concentrado es un solvente efectivo para reciclar residuos de celulosa en productos de valor agregado [29]. Por lo tanto, en este artículo se proponen pruebas experimentales usando papel de oficina desechado en Canadá.

Se agregan 4g de residuos de papel en 96mL de solución acuosa de ácido sulfúrico al 64% w/w previamente enfriada a -20°C y se realiza una agitación mecánica vigorosa a 800rpm durante 5min. Seguido de esto, la solución formada es extendida como una capa de 1mm de espesor sobre una bandeja y es sometida a un baño coagulante con solución acuosa de hidróxido de sodio al 10% w/v a -4°C durante 10 minutos. Las películas resultantes son lavadas con abundante agua y secadas con aire a 25°C. Adicionalmente, se realizaron muestras en las que en el baño coagulante se agrega una solución al 1% w/w de óxido de zinc y también en las que las películas lavadas son sumergidas en soluciones al 1 y 2% w/w de aceite de carvacrol, etanol y agua por 2 horas [29], lo último para proveer propiedades antibacterianas al producto fabricado.

Al obtenerse las muestras de biofilm, estas fueron sometidas a una serie de pruebas para ser caracterizadas. Entre ellas la espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier, difracción de rayos X, transmitancia, pruebas mecánicas para conocer propiedades como resistencia a la tensión,

elongación de ruptura, módulo de Young, y pruebas de actividad antibacteriana por medio del protocolo de susceptibilidad a la difusión en disco de Kirby-Bauer [29].

A raíz de estos ensayos, los autores concluyen que durante la disolución no hay generación de derivados de celulosa debido a los resultados de la espectroscopía infrarroja pero sí una pérdida de cristalinidad y cambio a celulosa poliforme, confirmado por el análisis de rayos X [29]. Por su parte, la transparencia de las películas obtenidas fue analizada a través de la transmitancia, la cual fue del 70 a 80%, es decir, relativamente alta, en longitudes de onda de 400 a 800nm, por lo tanto, el producto no es capaz de detener rayos UV [29]. Respecto a las propiedades mecánicas, las cuales pueden visualizarse en la **Tabla 3.**, se concluye que son equiparables a las de otra investigación [29] por parte de los autores donde se producen biofilms de celulosa a partir de pulpa del árbol de abeto titulado “Rapid dissolution of spruce cellulose in H₂SO₄ aqueous solution at low temperature” y donde se supera la problemática de cadenas cortas de celulosa que afectaba en la disminución de las propiedades requeridas a nivel mecánico por un bioplástico [29]. Con relación a la actividad antimicrobiana, se demostró que se pueden brindar este tipo de características activas a estos productos ya que en ambos casos, tanto usando óxido de zinc como aceite esencial de carvacrol, se generó una zona de inhibición repeliendo a las bacterias *E. coli* y *S. aureus* presentes en las pruebas, esta área fue más amplia al usar óxido de zinc [29].

Tabla 3.

Propiedades mecánicas del biofilm obtenido en “Concentrated sulfuric acid aqueous solution enables rapid recycling of cellulose from waste paper into antimicrobial packaging”.

Propiedad	Valor
Resistencia a la tensión (MPa)	77.55 ± 6.52
Elongación de ruptura (%)	2.67 ± 0.30
Módulo de Young (MPa)	5451.67 ± 705.23

Nota. La tabla 3 muestra los valores de las propiedades mecánicas obtenidas en los ensayos realizados en los biofilms obtenidos. Información tomada de: [29] C. Oliva et al., “Concentrated sulfuric acid aqueous solution enables rapid recycling of cellulose from waste paper into antimicrobial packaging,” Carbohydr. Polym., vol. 241, no. March, p. 116256, 2020, doi: 10.1016/j.carbpol.2020.116256.

Adicionalmente, se realizó con base en los reactivos implementados en este artículo un análisis básico de costos con el fin de comparar la rentabilidad económica de los métodos de producción de biofilm. El precio correspondiente a los 4g de papel de oficina reciclado equivaldría aproximadamente a 0,21 USD, la solución de ácido sulfúrico unos 0,024 USD [31], la solución de hidróxido de Sodio 0,027 USD [32], la solución de óxido de zinc 0,023 USD [33], para un total de 0,284 USD por cada 4g de biofilm. 71 USD/kg.

2.1.2. Producción de PHB usando celulosa como sustrato para la bacteria *Burkholderia Sacchari*

Debido a la alta popularidad de la utilización de papel reciclado como fuente de carbono para la obtención de poli-3-hidroxibutirato (PHB) y gracias a que este producto no es solo una alternativa amigable con el medio también, sino al mismo tiempo valoriza lo que se considera comúnmente como un desecho, los autores del artículo “Production of bioplastic (poly-3-hydroxybutyrate) using waste paper as a feedstock: Optimization of enzymatic hydrolysis and fermentation employing *Burkholderia Sacchari*” deciden realizar una comparación utilizando diferentes tiempos de cultivo, velocidades de agitación, volúmenes de trabajo y demás, analizando al final de sus resultados las propiedades fisicoquímicas del producto obtenido y comparándolos con los parámetros estándar del PHB a nivel comercial [30] .

En la realización de la fase experimental del proyecto se desarrollaron dos tipos de muestras, una con un debido pretratamiento y otra sin pretratamiento alguno. La etapa sin pretratamiento dio comienzo triturando el papel en pedazos de aproximadamente unos 2x5 mm con ayuda de una trituradora, además, este material fue sumergido en agua destilada seguido de una mezcla húmeda y un secado de la lechada a 60 °C [30]. Posteriormente el material seco se molió hasta obtener un material esponjoso y se usó en trabajo posterior.

En la segunda muestra desarrollada junto con un pretratamiento el WOP (waste office paper) se llevó a cabo utilizando 0.5% de peróxido de hidrógeno (H₂O₂) a 121°C y 15psi durante 30 min, después, el residuo sólido fue filtrado y lavado hasta alcanzar un pH neutral deseado, la biomasa restante fue entonces secada a 60°C durante toda una noche y molido hasta obtener un material esponjoso para ser almacenado e implementado en el experimento de hidrólisis enzimática [30].

La muestra que ha sido sometida a pretratamiento es posteriormente pasada por un proceso de hidrólisis bajo ciertas condiciones de agitación, carga de enzimas (celulasa, b-glucosidasa, y hemicelulasa) y volumen de trabajo (volumen ocupado por las sustancias involucradas en la hidrólisis en el equipo donde se realiza la operación). Después de realizar un estudio paramétrico con el fin de definir las condiciones más óptimas de trabajo para las variables anteriormente mencionadas, se llega a la determinación de los siguientes valores: carga de papel 5,0 g / L; agitación 242 rpm; volumen de trabajo 20%; celulasa 49,82 U / g; b-glucosidasa 20,9 U / g; hemicelulasa 29,5 U / g.

En cuanto al microorganismo (*B.Sacchari*), este fue precultivado en YPM (yeast peptone meat) por 24 horas a 30°C, las células fueron recolectadas por centrifugación a 4000xg (fuerza centrífuga) durante 15 minutos, posteriormente se suspendieron en agua destilada estéril y se usaron como inóculo para la producción de PHB. El hidrolizado fue recogido por centrifugación a 10000xg durante 10 minutos. El medio de producción de PHB se preparó mediante la adición de KH₂PO₄ (2,4 g/L), Na₂HPO₄ (2,5 g/L), MgSO₄ (0,5 g/L), (NH₄)₅[Fe(C₆H₄O₇)₂] (0,05 g/L), CaCl₂ (0,02 g/L) y NH₂SO₄ (1,2 g/L) al hidrolizado con una relación C/N de 20 y un pH ajustado de 7,2 usando NaOH al 10M. Luego, el medio fue filtrado a través de una membrana de Milipore en lugar de una esterilización a 121°C para prevenir la degradación de azúcares [30].

El medio fue entonces sembrado con inóculo al 1% (v/v) e incubado a 30°C y 160 rpm en un agitador rotatorio, las muestras se retiraron cada 24 horas hasta las 72 horas y el peso de la celda seca se estimó gravimétricamente por medio de centrifugación de cultivo a 4000xg a 4°C durante 10 minutos, después de eso fue lavado con agua destilada y secado durante la noche a 50°C.

El contenido de PHB fue determinado mediante metanólisis ácida seguida de una cromatografía de gases acoplada a un detector de ionización de llama, finalmente este contenido de PHB fue expresado como un porcentaje de peso celular. Para su caracterización se realizaron pruebas como análisis termogravimétricos, espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier, resonancia nuclear magnética, difracción de rayos X y análisis estadísticos [30].

Con el fin de mejorar y determinar la relación de C/N adecuada para la obtención de PHB, los desarrolladores del proyecto deciden implementar dos concentraciones diferentes de WOP (Waste office paper) hidrolizado, una muestra diluida (D-WOPH) y otra concentrada (C-WOPH). El hidrolizado de papel de oficina pretratado con H₂O₂ está principalmente compuesto de glucosa con una cantidad razonable de xilosa. Por tanto, es fundamental estudiar la asimilación del azúcar

producido del papel usado al PHB a través de la fermentación microbiana. Se usa el microorganismo ya mencionado y se utilizó para investigar la capacidad de utilización de azúcares mixtos del hidrolizado WOP para síntesis de PHB en las condiciones óptimas. En los resultados fue posible observar que C-WOPH mostró 35,6% PHB, 4,39 g/L DCW y 1,56 g/L polímero PHB donde casi el 50% de los azúcares se incorporaron a la célula para el crecimiento y acumulación de PHB después de 72 h de incubación. La biomasa más alta (3,63 g/L) y acumulación de PHB (44,2%) y reducción máxima utilización de azúcar (92,1%) se observó después de 48 h de cultivo utilizando D-WOPH. Los azúcares reductores se habían consumido por completo en el medio de cultivo a las 72 h provocando la degradación del PHB acumulado para ser utilizado para el crecimiento celular alcanzando 3,95 g / L. El rendimiento del polímero también alcanzó el máximo en este momento [30].

Se realizaron pruebas de degradación térmica en el material resultante, observando que, En la etapa inicial de degradación (130-230°C), se produjo una ligera pérdida de peso por la deshidratación de disolventes adsorbidos en el caso del PHB extraído. El principio de la degradación del polímero se debió a separación aleatoria de la cadena de los enlaces C-O. La segunda etapa de la pérdida de peso causada por el aumento de la temperatura de descomposición a 300°C resultó en la formación de ácido crotonico y contribuyó a la degradación masiva. El PHB derivado de *B. Sacchari* mostró mayor estabilidad con alto peso residual al final del proceso (350-600°C) ya que tomó mucho tiempo para alcanzar un porcentaje cercano al 100% de degradación, esto, debido a la presencia de posibles impurezas en el material. El polímero PHB convencional tiene más estabilidad térmica, indicado por T5% y T10% alcanzando entre los 282.6 y 286.1°C, respectivamente mientras que el PHB derivado alcanzó temperaturas cercanas a los 191,9°C y 263,3°C. Sin embargo, a mayor degradación, correspondiente a T50% de temperatura, el PHB extraído mostró una estabilidad casi similar a la del PHB/ STD (297°C) [30].

Adicionalmente, se demuestra que el patrón XRD de los picos del PHB extraído con ayuda del microorganismo fue bastante similar al estándar PHB y parecido a los patrones reportados de PHB producido con fuentes de carbono como el bagazo de arroz. También es importante resaltar que tanto el espectro de C como el espectro de H obtenidos demuestran que el polímero extraído de *B. Sacchari* a través de la fermentación de glucosa corresponde a un homopolímero PHB que además también coincide con el espectro PHB estándar y los espectros PHB reportados [30].

Este biopolímero, al estar alojado intracelularmente como reservas de fuente de carbono, debe ser separado de la biomasa producida para que sea útil, para esto, existen diversos métodos como lo son la extracción con solventes, la digestión enzimática o química, disrupción mecánica e incluso extracción con fluidos supercríticos [34]. El primero de los nombrados es el más difundido en este tipo de procesos, sin embargo, requiere grandes cantidades de solvente por gramos de PHA (polihidroxicanoatos, en general) extraído, además de las repercusiones ambientales y en la salud humana [34] a raíz de los solventes utilizados.

Uno de los procesos de extracción de PHA es el usado en “Evaluación de la obtención de polihidroxicanoatos (PHAs) partiendo del residuo de almidón de papa por medio de *Bacillus subtilis* a nivel laboratorio”, proyecto desarrollado por estudiantes de la Universidad de América y con desarrollo experimental en el año 2017, que, a su vez, los investigadores extrajeron de “Effect of different recovery strategies of P(3HB-co-3HHx) copolymer from *Cupriavidus necator* recombinant harboring the PHA synthase of *Chromobacterium* sp. USM2”. El método en cuestión fue llevado a cabo ajustando la biomasa con agua destilada hasta obtener una concentración de 10g/L de células para posteriormente realizar un pretratamiento con 8g/L de NaCl a 30°C por 3 horas. Enseguida, 4g/L de NaOH (0,1M) se agrega en la suspensión bacteriana y esta es agitada a 350rpm por 1 hora. Después, la suspensión fue centrifugada por 45 minutos a 6000rpm y lavado usando etanol al 20% v/v por 3 horas [35]. El material recuperado es desecado en ambiente controlado de humedad [36]. De esta forma, se obtiene la recuperación y pureza más alta de PHA en el artículo, con 95wt% y 90wt%, respectivamente [35].

Por último, para la obtención del PHB en forma de biopelícula, es necesario su transformación desde los pellets separados de la biomasa, tal y como se describe en “Films de PLA y PLA-PHB plastificados para su aplicación en envases de alimentos. Caracterización y análisis de los procesos de degradación”, donde el PHB es secado a 40°C por 4 horas y llevado a un homogeneizador a 180°C y 50rpm por 4 minutos, posteriormente, el material es conducido a una prensa caliente a la misma temperatura hasta que se funda, operación realizada a presión atmosférica por 2 minutos, y, después, se somete al siguiente ciclo de prensado, 3MPa por 1 minuto, 5MPa por 1 minuto y 10MPa por 2 minutos. Al finalizar, los biofilms son enfriados a condiciones ambientales [37].

Con el fin de evaluar la rentabilidad del proyecto se tomó en cuenta el análisis de costos realizado en el artículo “Production of bioplastic (poly-3-hydroxybutyrate) using waste paper as a feedstock: Optimization of enzymatic hydrolysis and fermentation employing *Burkholderia*

Sacchari” en donde los autores determinaron los costos de las sustancias involucradas en el proceso mediante recisión bibliográfica, en el cual para producir 1 kg de PHB por *B. Sacchari* utilizando papel de desecho como sustrato, se requieren 31,164 kg de papel desecho de oficina el cual tiene un costo aproximado 1,60 USD. Además, para la hidrólisis enzimática, es necesario contar con celulasa (49,82 U/g), hemicelulasa (29,5 U /g) y b-glucosidasa (20,9 U / g) que cuesta 0,155, 0,367, y 0,084 USD, respectivamente, por 31,164 kg de sustrato implementado. Se requiere de igual forma sulfato de amonio utilizado como fuente de nitrógeno, con un precio de 0,084 USD. Teniendo en cuenta otros costos industriales y de supervisión, el total del costo de producción de PHB a partir de C-WOPH fue de 5,09 USD/kg, y el de D-WOPH fue de 3,98 USD/kg como resultado de la mayor acumulación de PHB en el medio D-WOPH [30].

Además, se realizó la investigación correspondiente para determinar los costos asociados a la extracción del PHB y su posterior transformación en una biopelícula, la cual, es el producto final deseado. El precio del NaCl, de NaOH y del EtOH implementado para la extracción fue de 8,8E-7 USD, 0,0378 USD y 0,84 USD respectivamente, hablando de un total de 4,857 USD como costo total de la fabricación de una película de biofilm a partir de papel reciclado de oficina.

2.1.3. Producción de Acetato de Celulosa Plastificada

Según la investigación titulada “Recuperación de celulosa a partir de papel periódico post-consumo para la obtención de derivados de celulosa”, con el objetivo de disminuir las cantidades de residuos sólidos, actualmente se han desarrollado diversas investigaciones para elaborar productos menos agresivos con el medio ambiente, basados en la recuperación y tratamiento de materiales post-consumo entrando a formar parte de productos eco-eficientes normalmente nominados como productos renovables [38].

Tal es el caso de la celulosa, presente en una gran variedad de productos, como el tratado en la investigación enunciada, el papel periódico. En esta, se realiza la recuperación de la celulosa como nitrato y acetato de celulosa, derivados de la misma que pueden ser nuevamente útiles en forma de materia prima, aprovechando que, por ejemplo, el acetato de celulosa ha sido ampliamente usado en la manufactura de films, compuestos de moldeo y extrusión, fibras y lacas [12]. Sin embargo, para que el acetato de celulosa pueda ser utilizado como un material bioplástico es necesario la adición de plastificantes, además, teniendo en cuenta que la mayor variación en las propiedades se

logra modificando el tipo y la cantidad de plastificante [12], este hecho cobra aún más importancia en la fabricación de biofilms usando acetato de celulosa.

Para la obtención del derivado se realizaron pruebas con 2 reactivos diferentes, una en la que se agregó 100mL de una solución de ácido acético glacial y otra en la que fue agregada la misma cantidad de anhídrido acético, en ambas además se adicionó 1mL de ácido sulfúrico como catalizador junto con 6g de papel periódico. Las soluciones resultantes fueron llevadas a un baño termostato de aceite a 80°C por 24 horas con agitación ocasional para que ocurriera la acetilación. Al finalizar el tiempo, se sacó el producto obtenido del baño para disminuir su temperatura y recuperar el ácido, se precipitó y lavó con agua para alcanzar pH neutro para, por último, secarlo [38].

Se obtuvo acetato de celulosa en forma de polvo seco de un color similar a la arena, donde en la prueba con ácido acético glacial se produjeron 6,07g de acetato de celulosa a partir de papel periódico y 5,67g usando papel periódico tratado. En el caso del anhídrido acético fueron 6,10g con papel periódico y 5,70g con papel periódico tratado. Cabe resaltar que el papel periódico tratado se refiere al que antes del proceso descrito fue triturado, lavado y agitado con abundante agua, filtrado y secado a 60°C durante un lapso de 2 horas [38].

Para la plastificación de este polímero, existe una gran variedad de opciones, una de ellas es el ftalato de dibutilo, del que se muestra el procedimiento en “Preparación de membranas de triacetato de celulosa”, en donde 1 gramo de triacetato de celulosa se disuelve con agitación en 25mL de dimetilacetamida a 45°C, hasta obtener una disolución viscosa, incolora, completamente transparente y sin trazas de residuo insoluble [39]. Luego, se añade el plastificante en la cantidad requerida gota a gota y se deja reposar a 25°C hasta que la solución esté libre de aire. Para la formación del biofilm, se vierte la solución en una placa Petri de 12cm de diámetro formando una película homogénea y uniforme, esta placa es cubierta y se guarda para que se evapore el solvente utilizado hasta que se obtiene una película sólida que se sumerge en agua y se seca a vacío durante 12 horas [39].

Las propiedades del bioplástico obtenido a partir de este procedimiento son similares a las que se obtendrían al usar como plastificante ftalato de dimetilo o ftalato de dietilo al ser reactivos que pertenecen al mismo grupo de compuestos químicos. En “Criteria of Efficiency of Cellulose Acetate Plasticization” se detallan distintas propiedades mecánicas para el caso del ftalato de dietilo, las cuales se pueden observar en la **Tabla 4**.

Tabla 4.

Propiedades mecánicas de bioplástico plastificado con ftalato de dibutilo a diversas concentraciones.

Concentración de plastificante (%)	T de transición vítrea (K)	T de procesamiento (K)	Propiedades mecánicas del producto				
			Rango de T de trabajo (K)	Fuerza de fluencia (MPa)	Elongación de ruptura (%)	Tenacidad (kJ/m ²)	Esfuerzo de flexión (MPa)
13	408	503	117	78,0	12±5	60±10	88±1
17	398	498	115	66,0	15±5	66±10	81±1
20	388	488	106	58,0	19±3	72±10	69±1
23	385	483	102	53,5	19±5	88±7	62±1
28	380	473	102	42,0	21±3	100	46±1
33	376	463	88	29,0	35±1,5	100	32±0,5

Nota. La tabla 4 muestra distintas propiedades mecánicas probadas en bioplástico plastificado con ftalato de dibutilo en “Criteria of Efficiency of Cellulose Acetate Plasticization”. Tomado de: [40] O. A. Fridman and A. V. Sorokina, “Criteria of efficiency of cellulose acetate plasticization,” Polym. Sci. - Ser. B, vol. 48, no. 5, pp. 233–236, 2006, doi: 10.1134/S1560090406090028. [Online]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1134/S1560090406090028>.

De forma similar a lo aplicado con el método que implementa una solución de ácido sulfúrico, se realizó una investigación de costos con el fin de estimar la rentabilidad del proyecto. El costo de los 6g de papel utilizado sería proximadamente 0,31USD, el costo de la solución de ácido acético glacial 6% p/v es de 0,65 USD [41], del ácido sulfúrico 0,01643 USD [42], de anhídrido acético 0,05319 USD [43], la dimetilacetamida con un costo aproximado de 1,20 USD [44], el precio de ftalato de dibutilo es de aproximadamente 1,64 USD [45], del ftalato dietilo 1,74 USD [46], del ftalato dimetilo 2,5 USD [47] para un precio total aproximado de 6,3 USD por aproximadamente cada 6,07g de biofilm.

2.2. Método Multicriterio Seleccionado

Debido a la clase de criterios que se evaluarán en la matriz de selección se establece que es necesario poder priorizar algunos de estos criterios sobre otros que serán de igual forma evaluados, ya que, se analizarán aspectos del proceso como costos, factores ambientales, factores legales, de

seguridad, de factibilidad del proceso, disponibilidad de materias primas y propiedades mecánicas del biofilm resultante. Teniendo esto en cuenta, se desarrolla la jerarquización de las alternativas evaluadas con el método de sumas ponderadas, ya que este permite asignar un valor cuantitativo a cada una de las variables estudiadas de acuerdo a su nivel de importancia frente a otras variables, y al mismo tiempo no restringe el valor del peso que es posible asignarle a cada una de las alternativas a diferencia de los otros métodos mencionados (PUGH, TOPSIS y ELECTRE). Esto representa una ventaja a la hora de adecuar el método de sumas ponderadas al proyecto y abre las posibilidades a realizar un análisis un poco más profundo a los criterios fundamentales del mismo, debido a que puede llegar a darse el mismo nivel de importancia a más de una variable.

2.3. Selección de Criterios de Evaluación

Tomando en cuenta las características finales deseadas en el producto final resultante del método de producción de biofilm que sea seleccionado y a partir del estudio de referentes [27] se establecieron los siguientes criterios de evaluación, los cuales serán analizados en cada una de las alternativas de proceso disponibles.

2.3.1. Costos

Este factor se centra en la comparación de costos solamente respecto a la materia prima asociada al proceso de producción de cada uno de los métodos propuestos, ya que es necesario que la propuesta sea competitiva en términos económicos para que el producto pueda hacer frente en el mercado a otros ya existentes.

2.3.2. Factor Ambiental

Este criterio evaluará el aspecto medio ambiental del proceso, los impactos y posibles alteraciones que la implementación de ciertos reactivos pueda causar en el ambiente. Lo anterior debido a que uno de los enfoques del presente proyecto es contribuir a la reducción y aprovechamiento de residuos, así como a la producción responsable y sustentable, utilizando insumos que generen el menor impacto ambiental negativo posible.

2.3.3. Factibilidad

El criterio de factibilidad se encuentra enfocado en la disponibilidad de tecnología, insumos y materias primas en el territorio nacional colombiano, para la realización de los diferentes procesos, pues es fundamental que sea posible que el proceso de producción seleccionado sea implementado en el área local y nacional del que hace parte la empresa generadora de la principal materia prima (residuos de papel de oficina).

2.3.4. Rendimiento del Proceso

Evaluará la eficiencia del proceso, teniendo en cuenta la cantidad final de biofilm producido a partir de cierta cantidad de la principal materia prima, es decir, de residuos de papel de oficina. De esta forma, será posible reconocer si el aprovechamiento del subproducto generado por International House Bogotá está siendo considerable y puede llegar a generar una cantidad de producto que justifique la implementación del proceso.

2.3.5. Seguridad del Proceso

Analizará los riesgos implicados en el manejo de reactivos y equipos en cada uno de los procesos de producción de biofilm que se presenta como alternativa. Este aspecto es importante ya que de él depende la seguridad física de quienes van a llevar a cabo la manufactura del bioplástico, y, por otro lado, el manejo de sustancias peligrosas, que tengan una gran serie de restricciones y cuidados para su implementación puede ser un indicador de que se generarían también residuos peligrosos, difíciles de aprovechar y/o de disponer, al finalizar su uso.

2.3.6. Marco Legal

Se tomará en cuenta la regulación legal de los reactivos y desechos relacionados con cada uno de los procesos, ya que es posible que el uso de algunos reactivos en la producción restrinja la variedad de ocupaciones del producto obtenido, o que simplemente no sean permitidos en la manufactura de bioplásticos.

2.3.7. *Propiedades físicoquímicas y mecánicas del biofilm obtenido*

Uno de los criterios con mayor importancia, tomando en cuenta el producto final deseado, es el factor de las propiedades mecánicas del biofilm obtenido al final de cada uno de los métodos planteados, puesto que de estas dependen los posibles usos que pueda ser recomendados y asimismo el plástico o producto convencional con el que buscaría competir en el mercado.

Para la evaluación de este criterio se realizará una comparación entre los diferentes resultados reportados en cada uno de los procesos con el fin de determinar cuál es el más adecuado.

2.4. Aplicación método multicriterio

2.4.1. *Asignación de pesos relativos a los criterios de evaluación*

Para realizar esta jerarquización de la importancia de los criterios de evaluación se realizó una comparación enfrentando cada uno de ellos, es decir, una comparación de criterios por pares, de la misma forma que fue realizado en “Diseño de una torre de aireación y desgasificación para un cultivo semi-intensivo de tilapias en la empresa Lucarvel”. Los valores para la calificación se muestran en la **Tabla 5.**, para la cual se tiene en cuenta lo presentado en el apartado de Métodos de producción de biofilm con residuos de papel de oficina como materia prima y Selección de criterios de evaluación:

Tabla 5.

Valores de calificación de criterios.

Valor	Descripción
20	Mucho más importante
15	Más importante
10	Igual
5	Menos importante
1	Mucho menos importante

Nota. Valores para la calificación de criterios en la comparación por pares. Tomado de: [27] M. K. Montoya and S. Rodríguez, C. Palacios, “Diseño de una torre de aireación y desgasificación para un cultivo semi-intensivo de tilapias en la empresa Lucarvel.” [Trabajo de grado] Fundación Universidad de América, 2021. [Online]. Available: <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/8668/1/6161771-2021-2-IQ.pdf>.

2.4.2. Comparación de criterios por pares

De acuerdo con los valores posibles, se brindó una calificación a cada criterio respecto a los otros restantes, obteniendo así una calificación total para cada uno de ellos y además una suma global de estas calificaciones, para luego aplicar la ecuación 2, obteniendo los pesos relativos.

Ecuación 2.

Cálculo del peso relativo.

$$w_j = \frac{\sum a_{jk}}{a_{total}}$$

Nota. La ecuación 2 permite calcular el peso relativo de cada criterio para aplicarlo en el método de sumas ponderadas, en esta w_j es el peso relativo del criterio j , a_{jk} es la calificación del criterio j respecto a cada criterio k y a_{total} es la suma de las sumatorias de a_{jk} de todos los criterios.

Teniendo en cuenta lo anterior, se desarrolló la **Tabla 6.**, que muestra la comparación por pares.

Tabla 6.

Comparación de criterios por pares.

		Criterios							Suma	Peso relativo
Criterios		A	B	C	D	E	F	G		
	A		10	15	15	10	15	15	22	0,1896
	B	20		10	15	10	10	15	80	0,1896
	C	5	1		5	1	5	5	22	0,0521
	D	15	5	5		5	10	5	45	0,1066
	E	20	10	10	15		10	15	80	0,1896
	F	15	10	5	10	10		5	55	0,1303
	G	15	5	5	15	5	15		60	0,1422
	Total								422	1,0000

Nota. Comparación de criterios de evaluación por pares obtenido al evaluar cada uno de ellos respecto a los demás criterios usando la información de la tabla 5. Los criterios evaluados son costos (A), factores ambientales (B), factibilidad (C), rendimiento (D), seguridad del proceso (E), marco legal (F) y propiedades mecánicas (G).

Los resultados presentados en la **Tabla 7.** corresponden al peso relativo asignado a cada una de las variables evaluadas con el fin de determinar la mejor alternativa de proceso, para llegar a este

valor resultante se realizó una comparación de criterios entre pares como se describió anteriormente.

Una vez realizado el proceso de comparación se obtienen unos valores totales por criterio, de los cuales se puede deducir la jerarquía resultante de las variables consideradas. De forma general es posible analizar que tanto el factor ambiental, costos y seguridad del proceso se encuentran jerarquizados en el mismo nivel, lo que indica que serán los factores decisivos a la hora de seleccionar el método de producción más adecuado, ya que el proyecto se encuentra enfocado al aprovechamiento de residuos y que además podría impulsar la economía y la industria al abrir camino a un nuevo tipo de mercado, intentando en lo posible disminuir y reemplazar el uso de reactivos peligrosos o tóxicos tanto para el medio ambiente como para los funcionarios que los manipulen.

Es importante mencionar que el criterio de costos obtiene este peso relativo debido a que en términos de viabilidad de proyecto es crucial considerar la inversión inicial que sería necesaria para la ejecución del proceso de producción y que además debido a que se trata de un proceso medioambientalmente amigable es posible que la industria que lo implemente pueda acceder a ser beneficiario de un incentivo tributario de descuento en el impuesto de renta por inversiones en control del medio ambiente o en conservación y mejoramiento del medio ambiente, que según lo expresado por la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR), las personas jurídicas que realicen este tipo de inversiones, tendrán derecho a descontar de su impuesto sobre la renta (líquida) a cargo el 25% de las inversiones que hayan realizado en el respectivo año gravable, previa acreditación que efectúe la autoridad ambiental respectiva, en la cual deberá tenerse en cuenta los beneficios ambientales directos asociados a dichas inversiones [48].

El siguiente factor relevante en orden de jerarquía son las propiedades finales del biofilm, debido a que, para realizar el diseño conceptual del proceso de producción es necesario tener claro el tipo de características y propiedades finales que se desean obtener en el bioplástico, y en torno a esto se realizarán modificaciones al método para acomodarlo a las necesidades establecidas.

El aspecto legal es el siguiente criterio en orden de nivel según los resultados presentados en la **Tabla 7**. Para la evaluación de este criterio se tomó en cuenta que de forma general no existen grandes restricciones para poder llevar a cabo el proceso de producción de biofilm a partir de la materia prima disponible, y es por esto que no sería un gran punto de discernimiento para decantarse por un método u otro, más allá de que por la implementación de algún reactivo o

procedimiento uno o más de los métodos presenten limitaciones en los usos finales del bioplástico obtenido.

Justo por debajo del aspecto legal se encuentra el rendimiento en orden de prioridad, ya que según el análisis realizado en la evaluación de criterios, es posible que resulte mejor comprometer un poco el rendimiento del proceso debido a que se busca obtener un mejor producto que cumpla con los estándares de calidad registrados a nivel comercial para bioplásticos y que pueda suplir la necesidad de generación de bioplásticos, además, resultaría beneficioso para el enfoque que posee el proyecto la posibilidad de implementar reactivos más limpios que contribuyan al cumplimiento del objetivo ambiental.

Es posible observar que la factibilidad es el criterio de menor relevancia en comparación a los demás, esto es debido a que a la hora de realizar la confrontación con las otras variables se concluyó que no existe ninguna restricción de orden crítico por la cual no fuera posible realizar el proceso en el territorio nacional, ya que si bien es posible que deban adquirirse materias primas o algún tipo de maquinaria por medio de importaciones no es un hecho significativo para no ejecutar el proyecto, si no que influenciaría en otra variable de mayor importancia como los costos. Finalmente, de acuerdo a referentes consultados [27] se asigna el peso relativo a cada una de las variables.

Tabla 7.

Clasificación de criterios de evaluación según su peso relativo.

Clasificación	Criterio [27]	Peso relativo
1°	Factores ambientales (B)	0,1896
2°	Seguridad del proceso (E)	0,1896
3°	Costos (A)	0,1896
4°	Propiedades mecánicas (G)	0,1422
5°	Marco legal (F)	0,1303
6°	Rendimiento (D)	0,1066
7°	Factibilidad (C)	0,0521

Nota. La tabla 7 muestra la clasificación de los criterios de evaluación en orden descendente según el peso relativo obtenido.

Al conocer el peso relativo de cada uno de los criterios, es posible calificarlos dentro de la matriz de selección gracias a las distintas escalas descritas en la **Tabla 8.**, y, de esta forma, obtener la calificación de los distintos métodos de producción de biofilm a evaluar.

Tabla 8.

Escala de calificación para criterios de evaluación dentro de la matriz de selección.

Criterio	Calificación	Descripción	Criterio	Calificación	Descripción
A	1	Muy alto	B	1	Afectación muy alta
	2	Alto		2	Afectación alta
	3	Medio		3	Afectación moderada
	4	Bajo		4	Afectación baja
	5	Muy bajo		5	Afectación mínima
C	1	Muy baja factibilidad	D	1	Rendimiento muy bajo (0-24%)
	2	Baja factibilidad		2	Rendimiento bajo (25-49%)
	3	Factibilidad media		3	Rendimiento medio (50-74%)
	4	Alta factibilidad		4	Rendimiento alto (75-94%)
	5	Muy alta factibilidad		5	Rendimiento muy alto (95-100%)
E	1	Muy inseguro	F	1	Presenta problemas con las normativas y regulaciones.
	2	Inseguro		3	Presenta algunas restricciones por normativas o regulaciones
	3	Moderadamente seguro			
	4	Seguro			
	5	Muy seguro		5	No presenta ningún problema con las normativas y regulaciones
G	1	Muy malas			
	2	Malas			
	3	Moderadas			
	4	Buenas			
	5	Muy buenas			

Nota. La tabla 8 muestra las calificaciones y sus descripciones posibles para cada criterio de evaluación.

2.4.3. Desarrollo de la Matriz de Selección

A partir de la tabla anterior, se califican los distintos métodos de producción propuestos para así obtener el más adecuado. Este proceso se muestra en la matriz de selección de la tabla 9.

Tabla 9.

Matriz de selección.

Método de producción de biofilm	Criterio							Suma ponderada
	A	B	C	D	E	F	G	
Solución acuosa de H ₂ SO ₄	3	2	5	5	3	5	4	3,5306
Producción de PHB con <i>Burkholderia Sacchari</i>	5	5	2	1	5	5	4	4,2751
Plastificación de acetato de celulosa	1	4	5	5	3	3	3	3,1278
Peso relativo del criterio	0,1896	0,1896	0,0521	0,1066	0,1896	0,1303	0,1422	

Nota. La tabla 9 muestra la matriz de selección obtenida de acuerdo a la calificación brindada de cada criterio para cada uno de los métodos de obtención de biofilm.

Según lo presentado en la **Tabla 9.**, el método de producción de biofilm más adecuado es mediante la producción de PHB con la bacteria *Burkholderia sacchari*, seguido del uso de la Solución acuosa de H₂SO₄ para la obtención del bioplástico y finalmente la plastificación de acetato de celulosa.

Lo anterior, debido a la alta calificación obtenida en los criterios con mayor peso relativo; como en el caso del factor ambiental, donde, utilizar un microorganismo para la producción de un metabolito que a su vez es producto de interés con un residuo como el papel de oficina como sustrato, genera un impacto ambiental mínimo en comparación a la plastificación de acetato de celulosa, en el que se necesitan como reactivos químicos convencionales como el ácido acético, el anhídrido acético o el plastificante que se seleccionara, y, por supuesto, que el método químico, en el que se usa una solución de ácido sulfúrico, pues en este incluso pueden generarse residuos químicos como esta misma solución, así como la de hidróxido de sodio del baño coagulante y el agua usada para el lavado posterior a la solución; y la seguridad del proceso, ya que en la

fabricación del bioplástico no se usan reactivos con un alto riesgo asociado, distinto al caso en el que se aprovecha el ácido sulfúrico, el cual es corrosivo, clasificado como extremadamente riesgoso para su salud ya que su manejo puede causar quemaduras severas, daño en riñones y pulmones [49], o al de la plastificación del acetato de celulosa, donde el uso de un plastificante como el ftalato de dibutilo puede causar posiblemente efectos tóxicos en el desarrollo o la reproducción humana [50], es decir, es teratógeno.

Otro factor influyente en la calificación fue el marco legal, ya que no existe ninguna restricción respecto a los reactivos ni el microorganismo empleado y estos tampoco limitan las potenciales aplicaciones, misma situación de la producción mediante ácido sulfúrico pero no de la plastificación de acetato de celulosa, puesto que productos fabricados con ftalatos están restringidos en el apartado de juguetes y artículos de puericultura [51], por lo tanto, el bioplástico obtenido a través de este método se vería impedido en tener usos asociados a los ámbitos anteriormente nombrados. Asimismo, el costo representado por las materias primas es el menor de los métodos evaluados, el cual fue de 3,98 USD/kg, además de que las propiedades presentadas por el PHB son similares a los del plásticos convencionales como el polipropileno [52], lo que demuestra que puede ser considerado para su uso en tareas análogas.

Cabe aclarar que este método fue calificado con factibilidad baja dado que las condiciones para producción a través de medios microbiológicos son muy específicas y deben ser controladas a detalle teniendo variaciones mínimas, por lo que puede que los equipos requeridos sean más especializados respecto a las otras formas de obtención. También, la disponibilidad de la bacteria en el país es limitada [53], hecho que afecta en demasía este criterio. En adición, los procesos microbiológicos se caracterizan por tener rendimientos medios, y, teniendo en cuenta que los otros procesos analizados cuentan con un valor cercano al 100% del papel residuo utilizado, el criterio de rendimiento de la producción de PHB con *Burkholderia Sacchari* también es menor respecto a los otros dos métodos [29], [30], [38].

3. PROCESO DE PRODUCCIÓN DE BIOFILMS DE PHB (POLI-3-HIDROXIBURITATO) A PARTIR DE RESIDUOS DE PAPEL DE OFICINA

3.1. Poli-3-Hidroxiburitato (PHB)

El poli-3-hidroxibutirato (PHB) es uno de los polímeros más estudiados, fue primeramente descrito por Maurice Lemoigne en 1923 como un metabolito secundario producido por microorganismos como *Alcaligenes eutrophus*, *Alcaligenes latus*, *Rhizobium*, *Bacillus*, *Pseudomonas oleovorans*, *Azotobacter vinelandii*, *Ralstonia eutropha*, entre más de 70 otras especies. Es un poliéster alifático que se encuentra compuesto por cadenas lineales de ácido 3-hidroxibutanóico, con un peso molecular que puede variar entre los 60000 y 250000Da, aunque puede llegar a 2000000 con 20000 monómeros por molécula polimérica [54].

Este biopolímero es obtenido a partir de fuentes renovables, se degrada cuando se expone a ambientes biológicamente activos (a dióxido de carbono en condiciones aeróbicas y a metano en condiciones anaeróbicas) y es biocompatible. Es un material no tóxico, con características ópticas y que presenta una coloración amarillenta en estado puro, además, es estable frente a radiación por rayos ultravioleta y puede ser transformado mediante procesos como extrusión, inyección, termoformado y soplado [52].

3.1.1. Síntesis de PHB

Existen tres diferentes rutas de obtención de PHB, la primera siendo la polimerización sintética por apertura de anillo (utilizando b-butirolactona como reactivo y zinc y aluminio como catalizadores), la segunda mediante plantas y/o plantas transgénicas y la tercera (siendo hasta la fecha la más documentada) mediante fermentación bacteriana, más conocida como biosíntesis [52].

Las bacterias implementadas en esta última estrategia de producción pueden dividirse en dos categorías según las necesidades de cultivo que posean. El primer grupo de bacterias necesitará un medio durante su fase exponencial que sea deficiente en nutrientes tales como Nitrógeno, Magnesio, Azufre, Potasio u Oxígeno con un exceso en su reserva de carbono, ya que bajo estas condiciones se inducirá la interrupción del crecimiento celular y consecuentemente se consumirá

la reserva de carbono para la producción de PHB. El segundo grupo dentro de esta clasificación no necesitará de alguna deficiencia en nutrientes para producir el biopolímero [52]

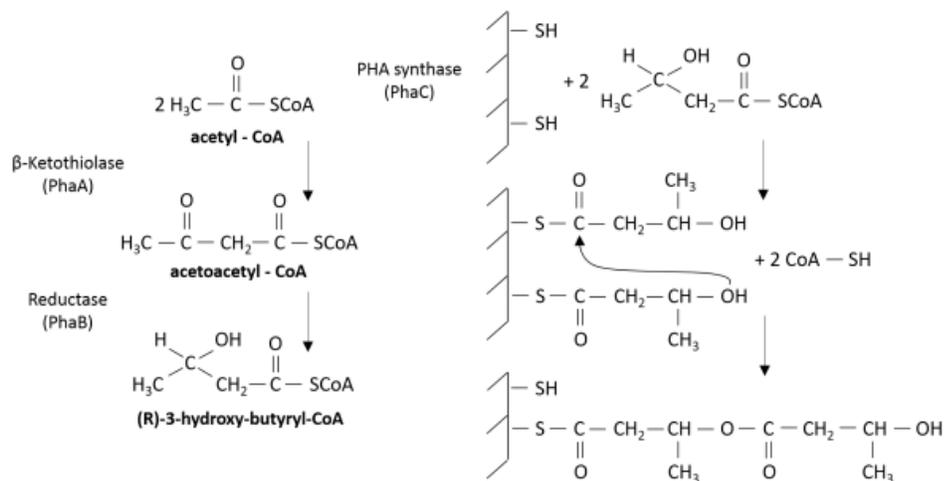
Cuando el sustrato es metabolizado por los microorganismos, es almacenado de forma intracelular como reserva de energía y carbono, dicha acumulación toma lugar en el citoplasma, en donde se forman gránulos con diámetros entre los 0.2-0.5 μm . El espacio que ocuparán dichas granulaciones será aproximadamente entre el 70-90% de la masa seca de la célula. La estructura propuesta de estas formaciones intracelulares es un núcleo hidrofóbico compuesto por PHB envuelto por una monocapa de fosfolípidos [52].

Es posible resumir la síntesis de PHB en tres etapas, que se demuestran después en la **Figura 6.**:

- La atenuación de la coenzima Acetil A en acetoacetyl-CoA, catalizada por la enzima β -cetotiolasa (PhaA).
- La enzima PHA-reductasa (PhaB) cataliza la hidrogenación de acetoacetyl-CoA, formando el monómero (R)-3-hidroxi-butiril-CoA.
- Ocurre la polimerización de (R)-3-hidroxi-butiril-CoA, catalizada por la enzima PHB polimerasa (PhaC), formando el PHB [52].

Figura 6.

Mecanismo de síntesis de PHB.



Nota. La figura muestra el mecanismo de síntesis de PHB por *Ralstonia eutropha* [52] A. J. dos Santos, L. V. Oliveira Dalla Valentina, A. A. Hidalgo Schulz, and M. A. Tomaz Duarte, "From Obtaining to Degradation of PHB:Material Properties. Part I," Ing. y Cienc., 2017, doi: 10.17230/ingciencia.13.26.10. [Online]. Available: <http://www.scielo.org.co/pdf/ince/v13n26/1794-9165-ince-13-26-00269.pdf>.

3.1.2. Extracción de PHB

Con el fin de obtener el biopolímero contenido de forma intercelular por la bacteria, es necesario generar la ruptura de los límites celulares con la consecuente liberación al medio de otros metabolitos que dificultan el proceso de purificación y determinación del polímero. Es por esto que existen diferentes métodos de extracción, los cuales permiten ajustar el proceso a las necesidades y purificación final del producto que se desea obtener [54].

3.1.2.i. Tratamiento con hipoclorito de sodio. Aunque se trata de un agente oxidante fuerte que destruye las membranas biológicas y todos los componentes celulares, en ambientes controlados puede ser utilizado en la purificación de PHB. Se han reportado procesos de purificación de PHB en una relación 1:15 con solución de hipoclorito de sodio al 5,25%, con un peso molecular promedio en la biomasa de partida de 1200000Da y un índice de polidispersión de 3,0, obteniendo un producto final con un porcentaje de pureza del 95%. El principal inconveniente de este método económico y eficiente es la posible degradación parcial del polímero (que puede ser prevenida implementando bisulfito de sodio), de igual forma, a nivel ambiental, el tratamiento de los residuales clorados puede resultar inconveniente [54].

3.1.2.ii. Tratamiento con agente surfactantes. A bajas concentraciones, las moléculas de estas sustancias se insertan en la bicapa lipídica de la membrana celular saturando el sistema al aumentar su concentración paulatinamente, generando la ruptura de la membrana celular y formándose grandes micelas que contienen fosfolípidos y moléculas del surfactante. En este tratamiento las células liofilizadas fueron suspendidas en solución de dodecil sulfato de sodio al 1% p/v, con un pH de 10,2 y solución del surfactante no iónico octil fenol etoxilato (Triton X-100) al 1% p/v con un pH de 12,5 incubada a 37°C durante 15min. Posteriormente fue centrifugada y el precipitado mantenido con agitación a temperatura ambiente por 1min en solución de hipoclorito de sodio al 5% p/v, finalmente se separa el precipitado, se somete a lavado y liofilización del producto final de PHB. La eficiencia en la purificación del biopolímero implementando este método puede disminuir hasta en un 10% [54].

3.1.2.iii. Extracción con solventes orgánicos. Es uno de los procedimientos de extracción más utilizados, sin embargo, debido a la alta viscosidad que muestran los PHAs se requieren grandes cantidades de solventes como cloroformo, cloruro de metileno, metanol o etanol, lo cual puede elevar los costos del proceso de producción de PHB. Existen diferentes tratamientos relacionados con el uso de solventes para la extracción del biopolímero, uno de ellos es la extracción mediante una lisis celular y calentamiento a reflujo en metanol, con posterior filtración y reflujo con 1,2-dicloroetano, filtración, enfriamiento por debajo de 0 °C para formación de un gel, prensado y secado a 100 °C [54].

3.1.3. *Propiedades físicas*

3.1.3.i. Masa molar. La masa molar de este polímero puede variar según el microorganismo y fuente de carbono implementada, la duración de la fermentación, la tasa de crecimiento y las condiciones y métodos de purificación. Este valor puede oscilar entre los 10000 y 3000000g/mol, además, el valor crítico (cifra que indica el tope mínimo sobre el cual no existe pérdidas o afectaciones en las propiedades mecánicas del producto) se encuentra actualmente estimado en 16000g/mol [52].

3.1.3.ii. Propiedades cristalinas. El PHB es un polímero semicristalino, debido a que su larga cadena polimérica siempre presentará una fase cristalizada y otra amorfa. La fase cristalina depende de la regularidad de su estructura la cual al mismo tiempo depende de la ruta de sinterización empleada. Teóricamente se registran varios valores en cuanto al porcentaje de cristalinidad del material, mientras algunos autores aseguran que se encuentra sobre el 50%, otros establecen que en realidad se encuentra sobrepasando los valores del 60% o incluso entre el 50%-80% [52].

3.1.3.iii. Propiedades térmicas. En un polímero semicristalino, como lo es el PHB, la temperatura de transición vítrea (T_g) determinará el cambio entre el estado vítreo de la parte amorfa del material a un estado líquido. Cuando la temperatura se encuentra por debajo de la T_g , el movimiento de los segmentos de la cadena polimérica se encuentra restringidos. Para el caso del PHB se registran valores de transición vítrea de entre 0°C a 5°C , para la temperatura de fusión entre los 170°C hasta los 180°C y su temperatura de degradación registrada es 260°C [52].

3.1.3.iv. Propiedades mecánicas. Después de haber sido procesado, el PHB atraviesa diferentes cambios físicos en sus dos fases (cristalina y amorfa) lo cual puede causar el endurecimiento o debilitamiento parcial del material, lo cual se conoce como envejecimiento del PHB. Este fenómeno ocurre por dos factores, la cristalización secundaria y el envejecimiento físico [52].

La cristalización secundaria sucede en la tercera etapa de cristalización, la cual ocurre después de que el material se enfría sin cristalizar su estructura, y termina la etapa catalítica en la cual la cristalización se da a una alta tasa [52].

Una vez el polímero disminuye su tasa de cristalización y alcanza una etapa de autobalance se llega a la etapa de cristalización secundaria, la cual tiene lugar en la parte amorfa del material a temperatura ambiente que es conocido por la formación de cristales imperfectos en los espacios de esferulitas interlaminares que pueden restringir el movimiento de esta fase amorfa, lo cual, inhabilita la dispersión de energía por el flujo viscoso [52].

En cuanto al envejecimiento o desgaste físico, se puede decir que es la relajación producida por el movimiento residual de las cadenas poliméricas a temperaturas inferiores a la T_g , este fenómeno produce una reducción en el espacio libre disponible del material, lo cual al mismo tiempo disminuye y restringe la movilidad de las cadenas, que puede traducirse en el endurecimiento del material [52].

A raíz de estas dos anomalías se pueden ver afectadas propiedades físicas como los son el módulo de Young, el grado de cristalización, la tenacidad y elongación del biopolímero. Por ejemplo, el módulo de Young aumenta, indicando la rigidez del material, el valor de elongación hasta punto de ruptura disminuye, y la resistencia al impacto disminuye evidenciando el debilitamiento del PHB [52].

Adicionalmente, se observan en la **Tabla 10.**, diferentes valores para algunas variables mecánicas del polímero evaluadas bajo estándares ASTM:

Tabla 10.*Algunas propiedades mecánicas del PHB medidas de acuerdo con estándares ASTM.*

Propiedad	Norma B189C-1/18BC-1	Norma B189D-1	Norma B1000
Fuerza de tensión (MPa)	30	32	36
Elongación a ruptura (%)	2,2	4,0	2,0
Módulo de Young (MPa)	2600	2200	3800
Resistencia al impacto (J/m)	23	28	36

Nota. Se muestra el valor de algunas propiedades mecánicas presentadas por el PHB y medidas según estándares ASTM. Tomado de [52] A. J. dos Santos, L. V. Oliveira Dalla Valentina, A. A. Hidalgo Schulz, and M. A. Tomaz Duarte, "From Obtaining to Degradation of PHB:Material Properties. Part I," *Ing. y Cienc.*, 2017, doi: 10.17230/ingciencia.13.26.10. [Online]. Available: <http://www.scielo.org.co/pdf/ince/v13n26/1794-9165-ince-13-26-00269.pdf>.

3.1.4. Aplicaciones

Gracias a sus características de biodegradabilidad y biocompatibilidad, el PHB presenta un gran potencial para aplicaciones relacionadas con el contacto directo con sistemas orgánicos, como lo pueden ser los seres humanos, los animales, el medio ambiente, la agricultura y sus productos, etc. Por tanto, este polímero cuenta con presencia en una gran cantidad de tipos de industrias, como se muestra en la **Tabla 11**.

Tabla 11.*Aplicaciones de PHB según el área.*

Área	Aplicación
Biomédica	Suturas, cultivo de tejidos para implantes, implantes quirúrgicos, vendajes, injertos para huesos y venas, ingeniería del corazón (válvulas y piezas).
Farmacología	Encapsulación de medicinas para liberación controlada
Packaging	Empaques de comida
Veterinaria	Encapsulación de medicinas veterinarias
Agricultura	Encapsulación de fertilizantes
Medio ambiente	Bolsas, botellas, productos desechables, elementos de higiene personal, envolturas, pañales biodegradables, remediación de áreas afectadas por derrames de aceite.
Industrial	Recuperación de oligómeros y monómeros para su uso en la síntesis de polímeros

Nota. La tabla muestra algunas aplicaciones del PHB de acuerdo a distintos tipos de industria. Tomado de [52] A. J. dos Santos, L. V. Oliveira Dalla Valentina, A. A. Hidalgo Schulz, and M. A. Tomaz Duarte, "From Obtaining to Degradation of PHB:Material Properties. Part I," *Ing. y Cienc.*, 2017, doi: 10.17230/ingciencia.13.26.10. [Online]. Available: <http://www.scielo.org.co/pdf/ince/v13n26/1794-9165-ince-13-26-00269.pdf>.

3.2. *Burkholderia sacchari*

Es una especie de bacteria que pertenece al filo proteobacteria, aislada originalmente en Brasil en la década de los 90's del suelo de un cultivo de caña de azúcar, de aquí surge parte de su nombre "Sacchari" haciendo referencia a la sacarosa, su principal sustrato en este tipo de suelo [53], este género de bacterias, es capaz de habitar en diferentes ambientes, tales como, animales, plantas, suelo y agua. En plantas se ha observado colonizando tallos, raíces, hojas o presentando comportamientos endófitos, de forma específica la especie *Sacchari* de este género se ha caracterizado por su amplia colonización de suelos [55].

Las colonias de esta cepa obtenidas en un medio de cultivo de caldo nutritivo con blancas y opacas debido a la acumulación de 3HB y 3HB-co-3HV. Sus células son bacilos rectos, Gram negativas y su descomposición por lisis se da con KOH al 3%, son móviles gracias a la presencia de flagelos polares de aproximadamente $0 \pm 5-0 \pm 8 \mu\text{m}$ de ancho y $1 \pm 5-3 \pm 0 \mu\text{m}$ de largo [53], son bacterias no esporuladas, que pueden presentar dimensiones aproximadas de 0,5-1 x 1,5-1 mm, además se reconoce la habilidad de esta bacteria como degradadora de polialcanoatos, lo cual sugiere la posibilidad de utilizar esta especie en biorremediación y rizorremediación [55].

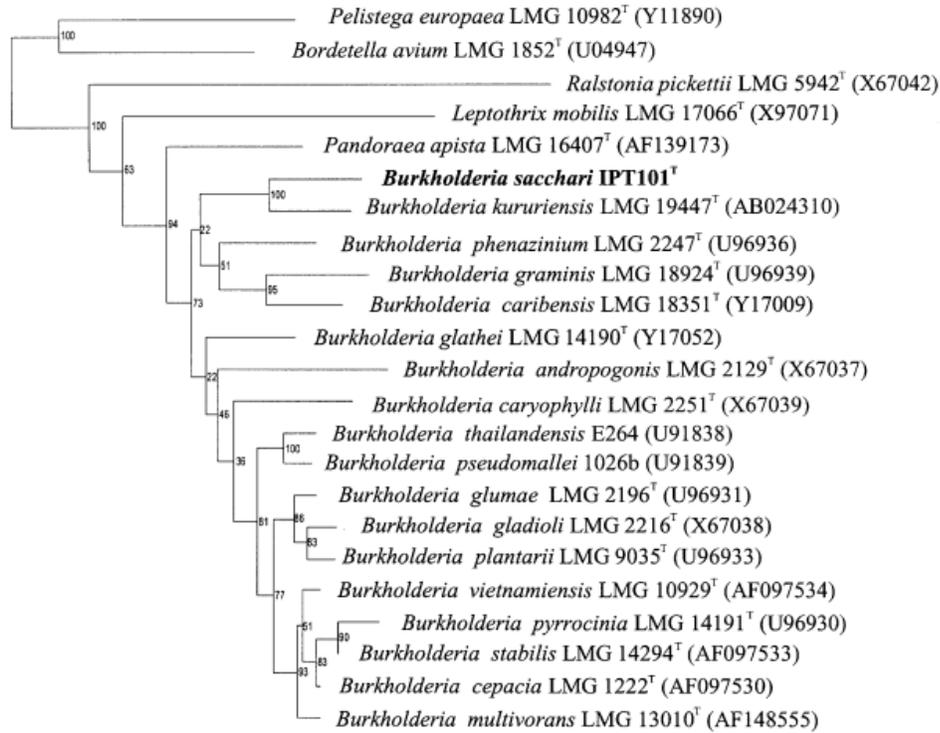
Este tipo de bacterias (*Burkholderia*) utilizan una amplia variedad de compuestos orgánicos como fuente de carbón, son quimiorganotrofas y aerobias. Poseen de forma general una superficie lisa a excepción de la *B. pseudomallei*, la cual puede presentar colonias rugosas.

Son bacterias mesófilas, de las cuales se registra un buen crecimiento en temperaturas entre los 25°C y 37°C, con un crecimiento óptimo entre los 28°C y 30 °C. No se registra crecimiento más allá de los 10 días, además a temperaturas tales como 7°C o 42°C no se observa presencia de esporas. Se produce Oxidasa y Catalasa con una proporción entre el 59 y 69,5% [55], el nitrato se reduce a nitrito y no se observa licuefacción de gelatina o hidrólisis de esculina [53].

Presenta un porcentaje de similitud con *Burkholderia Kururiensis* de 97,5%, con *Burkholderia stabilis*, *Burkholderia pyrrocinia* y *Burkholderia graminis* del 96% y con *Burkholderia cepacia* genomovar III del 95,9% [53]. Su posición filogenética se presenta en la **Figura 7**.

Figura 7.

Árbol filogenético de la bacteria *Burkholderia Sacchari*.



Nota. La figura muestra la estructura del árbol filogenético perteneciente a la bacteria *Burkholderia Sacchari* y bacterias semejantes. Tomado de: [53] L. F. Silva, “*Burkholderia sacchari* (synonym *Paraburkholderia sacchari*): An industrial and versatile bacterial chassis for sustainable biosynthesis of polyhydroxyalkanoates and other bioproducts,” *Bioresour. Technol.*, vol. 337, no. April, 2021, doi: 10.1016/j.biortech.2021.125472. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852421008129>.

3.3. Descripción del proceso

La producción comienza con los residuos de papel convencional impreso, producidos por las distintas actividades de la empresa International House Bogotá, la cual puede producir hasta 262,8kg/mes del material a utilizar, el promedio es de 145,25kg/mes. El proceso es llevado a cabo mediante el aprovechamiento de la materia prima como sustrato para el cultivo de la bacteria *Burkholderia sacchari* y obtención del PHB como metabolito intracelular de este organismo para su posterior transformación. Al provenir la materia prima de la ciudad de Bogotá, el proceso de producción ocurre también allí, donde la presión atmosférica es de 75135Pa según la medición

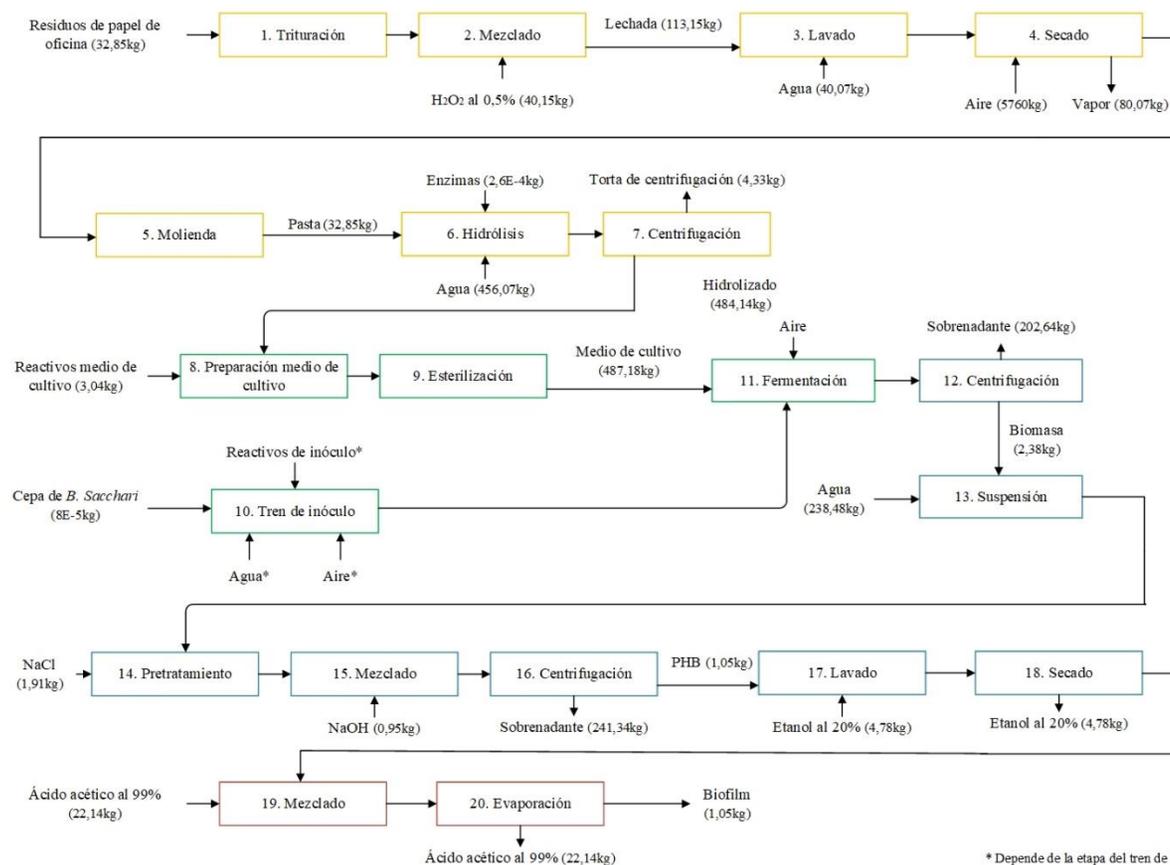
realizada por la Universidad Santo Tomás el 3 de noviembre de 2021 [56], y la temperatura promedio es de 13,1°C, de acuerdo al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) [57].

Para esto, se divide este promedio mensual de materia prima en 5 lotes de 32,85kg cada uno, produciendo así 1,05kg/lote de biofilm de PHB, con la finalidad de reducir el tamaño de los equipos requeridos, además de que el tiempo de algunas operaciones (hidrólisis, tren de inoculación y fermentación) es muy alto respecto a las otras dentro del proceso. Las cantidades necesarias para llevar a cabo el proceso de producción se encuentran relacionadas en el balance de masa, en el anexo 1.

El proceso se divide en 4 partes: Preparación del sustrato; upstream y fermentación; downstream o extracción de PHB; transformación de PHB. Este proceso de producción se muestra en la **Figura 8.**, como diagrama de bloques (BFD) y de forma más detallada en la **Figura 9.**, con el diagrama de proceso (PFD).

Figura 8.

Diagrama de bloques BFD.

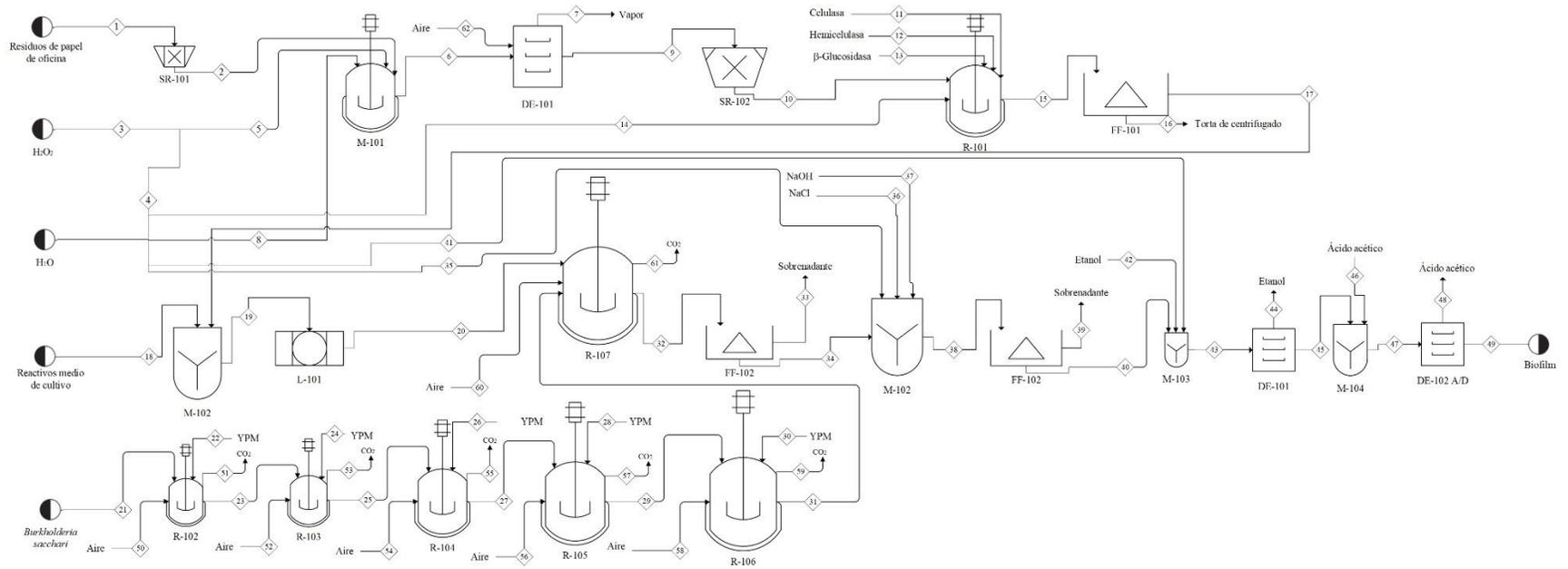


Operación	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Temperatura (°C)	13,1	121	13,1	60	13,1	13,1	13,1	13,1	13,1	30	30	4	30	30	30	13,1	13,1	13,1	80	80
Agitación (rpm)	-	50	50	-	520	242	10000xg	50	-	250	250	4000xg	50	50	350	6000	50	-	150	-
Tiempo (h)	0,17	0,5	0,17	8	0,08	120	0,17	0,17	-	24	48	0,17	0,17	3	1	0,75	0,08	-	1	0,9

Nota. Se muestra el BFD para la producción de biofilms de PHB a partir de residuos de papel de oficina usando la bacteria *Burkholderia sacchari*.

Figura 9.

Diagrama de proceso (PFD).



Nota. Se muestra el diagrama PFD para la producción de biofilms de PHB a partir de residuos de papel de oficina usando la bacteria *Burkholderia sacchari*.

3.3.1. Preparación del Sustrato

La preparación del papel para la fermentación fue realizada de acuerdo con lo reportado en “Production of bioplastic (poly-3-hydroxybutyrate) using waste paper as a feedstock: Optimization of enzymatic hydrolysis and fermentation employing *Burkholderia Sacchari*”, específicamente con base en el caso al que se refieren como residuo de papel de oficina con pretratamiento, debido a que de esta forma se obtuvieron mejores resultados, pues se evidenciaron contenidos más altos de celulosa y menores de hemicelulosa, lignina y cenizas en el papel pretratado respecto al que no fue sometido a pretratamiento alguno, como puede observarse en la **Tabla 12**.

Tabla 12.

Comparación de composición de papel sin pretratamiento y pretratado.

Componentes	Papel sin pretratamiento (%)	Papel pretratado (%)
Celulosa (glucano)	52,16±1,63	73,28±1,24
Hemicelulosa (xilano)	9,54±0,63	5,62±0,24
Carbohidratos totales	61,7±2,01	78,9±1,63
Lignina	15,32±1,16	2,61±0,28
Cenizas	18,52±1,32	10,56±1,26
Humedad	4,24±1,16	6,54±1,42

Nota. La tabla muestra el porcentaje de los componentes presentes en papel sin pretratamiento y pretratado con H₂O₂ al 0,5%. Tomado de: [30] H. Al-Battashi et al., “Production of bioplastic (poly-3-hydroxybutyrate) using waste paper as a feedstock: Optimization of enzymatic hydrolysis and fermentation employing *Burkholderia sacchari*,” J. Clean. Prod., vol. 214, pp. 236–247, 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.12.239. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652618339611>.

Dicho pretratamiento inicia con la reducción del tamaño de las hojas de papel gracias a una trituración, seguido de su mezclado con una solución de H₂O₂ en agua al 0,5% v/v a 121°C durante 30min [30]. Según el artículo mencionado, posteriormente se hace una filtración para retener la fase sólida y se lava con agua destilada para neutralizar su pH y se seca en horno a 60°C, después el material seco pasa a ser molido, disminuyendo aún más el tamaño de partícula para ser hidrolizado.

Sin embargo, se evaluó, como se muestra a continuación, la variación del pH al utilizar la solución de H₂O₂ a dicha concentración en el filtrado y lavado para verificar si estas operaciones deben mantenerse en el proceso.

Con base en los datos presentados en la **Tabla 13.**, extraída de [58] se realizó una regresión gráfica, evaluando cuál de los modelos matemáticos presentaba un mayor grado de ajuste a la tendencia de los datos, esto pudo determinarse mediante la observación del comportamiento del factor R², de esta forma se estableció que el modelo polinómico de grado 6 presentaba el mejor ajuste posible.

Tabla 13.

Comportamiento del pH a la variación en la concentración de H₂O₂.

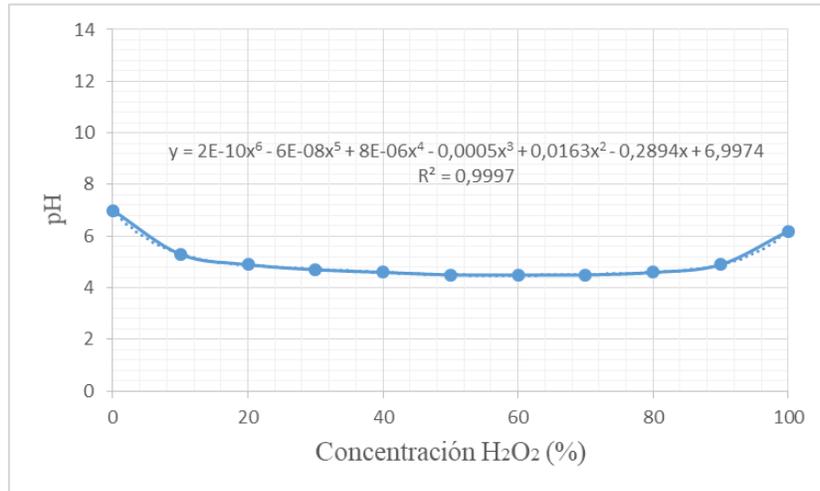
Concentración H ₂ O ₂ (%)	pH
0	7
10	5,3
20	4,9
30	4,7
40	4,6
50	4,5
60	4,5
70	4,5
80	4,6
90	4,9
100	6,2

Nota. La tabla muestra el comportamiento del pH de acuerdo con la variación en el porcentaje de agregación de H₂O₂. Tomado de: [58] USP technologies, “What is the pH of H₂O₂ solutions - USP Technologies,” 2021. [Online]. Available: <https://www.usptechnologies.com/what-is-the-ph-of-h2o2-solutions/>.

Posteriormente se obtuvo la ecuación correspondiente al comportamiento de los datos como se muestra en la **Figura 10.**, ecuación que permite la obtención del valor del pH a cualquier concentración de peróxido asignada.

Figura 10.

Gráfica concentración vs pH



Nota. La gráfica esquematiza el comportamiento del pH al variar la concentración de H₂O₂.

De esta forma se reemplazó el valor de la concentración de H₂O₂ indicada en el artículo guía por la variable expresada en la ecuación resultante, obteniendo el resultado registrado en la **Tabla 14.**

Tabla 14.

Comportamiento del pH a una concentración de H₂O₂ de 0,5%.

Concentración H ₂ O ₂ (%)	pH
0,5	6,8
0	7
10	5,3
20	4,9
30	4,7
40	4,6
50	4,5
60	4,5
70	4,5
80	4,6
90	4,9
100	6,2

Nota. La tabla muestra el comportamiento del pH a una concentración de 0,5% de H₂O₂. Contiene información tomada de: [58] USP technologies, “What is the pH of H₂O₂ solutions - USP Technologies,” 2021. [Online]. Available: <https://www.usptechnologies.com/what-is-the-ph-of-h2o2-solutions/>.

Como es posible observar, el valor del pH correspondiente a la concentración de H₂O₂ expresada en el artículo (0,5%) no dista mucho de un valor completamente neutral, sin embargo, se mantuvo el lavado como una medida de prevención ante los posibles efectos que podría causar no neutralizar la lechada de papel tratado en operaciones posteriores, por ejemplo, la fermentación, que requiere de condiciones específicas de pH, temperatura, agitación, entre otros enunciados en su sección, para la formación de PHB. Por otro lado, se retiró la operación de filtración, debido a que la humedad que sería retirada en el proceso sería recuperada al llevar a cabo la operación del lavado.

A continuación, se ajustó la cantidad de agua implementada en el lavado, teniendo en cuenta una relación de 1:1 con la masa de papel y realizando un sobredimensionamiento del 10% únicamente para asegurar la cobertura total de la masa. Posteriormente, se seca la masa para retirar completamente la humedad presente, esto se lleva a cabo en un secador de bandejas a 60°C, seguido de una molienda con el fin de disminuir el diámetro de partícula para facilitar el proceso de hidrólisis.

Es de suma importancia considerar que dicho secador, al involucrar la evaporación de una masa significativa de agua y un cambio de temperatura de magnitud considerable debe tenerse en cuenta que este debe contar con una corriente de aire implementada para el retiro de humedad de la masa celulósica. Es por esto por lo que mediante el uso y desarrollo de la **Ecuación 3**, se calcula el flujo al cual circula el aire dentro del equipo.

Ecuación 3.

Cálculo del flujo de aire necesario en un secador

$$\dot{m}_{ai} = \frac{\dot{m}_w * (Cp_w * \Delta T_w + h_{fg})}{n_s * Cp_{ai} * \Delta T_{ai}}$$

Nota. Se muestra la ecuación para calcular el flujo de aire necesario en un secador.

Considerando que \dot{m}_{ai} es el flujo de aire, \dot{m}_w el flujo del agua a retirar (4.055E-4 kg/s) obtenido del balance de masa, Cp_w la capacidad calorífica del agua (4.186 kJ/kg*K) [59], ΔT_w el cambio de temperatura que experimenta la masa celulósica (46.9 K) obtenido del balance de energía , h_{fg} la entalpía de vaporización del agua (2258.36 kJ/kg) [60], n_s la eficiencia (1), Cp_{ai} la capacidad

calorífica del aire atmosférico ($1.005 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$) [60] y ΔT_{ai} el cambio de temperatura que experimenta el aire en la etapa del secado (46.9 K) obtenido del balance de energía.

Partiendo de la hipótesis de que el calor de vaporización ganado por la masa celulósica es igual producto del calor perdido por o cedido por la corriente de aire y la eficiencia del secado, que en este caso al considerarse teóricamente ideal sería de 1 (100%). Se procede entonces a reemplazar los valores correspondientes para cada una de las variables mencionadas como se muestra en el Anexo 2 para obtener un valor final de $0,20 \text{ kg}$ de aire por segundo.

Para la hidrólisis, se adecuó la concentración del papel según el volumen efectivo en el reactor final de fermentación, y se agregan las enzimas encargadas de degradar los componentes del papel a azúcares más accesibles como fuente de carbono para el microorganismo, para ello, se utiliza celulasa, hemicelulasa y β -glucosidasa. Esta operación se realiza con agitación constante a 242 rpm y un volumen de trabajo del equipo de aproximadamente 20% . Con el objetivo de separar el hidrolizado en el sobrenadante, se realiza centrifugación a $10000 \times g$ por 10 min , el cual es utilizado después en la preparación del medio de cultivo [30].

3.3.2. Upstream y fermentación

La segunda sección del proceso se lleva a cabo igualmente según la bibliografía mencionada en la preparación del sustrato [30]. Por lo tanto, la preparación del medio de cultivo se realiza agregando al hidrolizado KH_2PO_4 , Na_2HPO_4 , MgSO_4 , $(\text{NH}_4)_5[\text{Fe}(\text{C}_6\text{H}_4\text{O}_7)_2]$, CaCl_2 y NH_2SO_4 que proveen el nitrógeno y demás nutrientes necesarios para la reproducción celular del microorganismo. Este se mantiene con una relación C/N de 20 y pH de 7,2 gracias a la adición de NaOH. Luego, se realiza una filtración con membrana como método de esterilización y prevención contra sólidos no deseados [30].

Para la formación del inóculo, en la misma referencia se informa que este se realiza en un medio con agua, agar, yeast extract, meat extract, peptona, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ y CaCl_2 , para después realizar una centrifugación para separar la biomasa obtenida, ponerla en suspensión en agua y llevar el $1\% \text{ v/v}$ de esta al reactor de fermentación donde se acumulan finalmente las colonias bacterianas con el PHB en su interior [30], sin embargo, la información respecto a qué concentración se hace dicha suspensión o qué cantidad de biomasa activa contiene no es suministrada, por lo tanto, se decide cambiar este método por un tren de inóculo de 5 pasos, en el cual se obtiene la biomasa necesaria

para trabajar en el volumen efectivo del reactor y producir el PHB necesario. Dicho tren de inóculo se hace sembrando una biomasa inicial de 0,4g/L tal como se reporta en [61] dado que en dicha investigación se usa el mismo microorganismo para generar el mismo producto y que las concentraciones típicas para las inoculaciones rondan comúnmente este valor, y suponiendo que en cada escala del tren de inóculo se llega a la concentración máxima de 3,63g/L así como se muestra en [30]. La inoculación en cada paso tiene una duración de 24 horas, se realiza a 30°C y 250rpm.

El medio de cultivo y el inóculo son añadidos al biorreactor, donde permanecen a 30°C durante 48h, controlando su pH a 7,2 con NaOH [30].

Tanto el biorreactor de fermentación como los involucrados en el tren de inóculo deben tener una corriente de aire entrante para proveer del oxígeno necesario para la supervivencia de la bacteria dado que es un microorganismo aerobio. Para esto, se construye la ecuación de la reacción bioquímica como se reporta en [62], a partir de la **Ecuación 4.**:

Ecuación 4.

Ecuación general de reacción bioquímica para un microorganismo aerobio

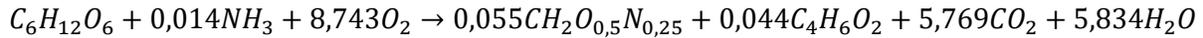


Nota: La ecuación muestra la reacción bioquímica para un microorganismo aerobio, donde b, c, d (rendimiento biomasa sustrato), e (rendimiento producto sustrato), f, g, son los coeficientes de los reactivos o productos que acompañan, estos dependen de la reacción específica que se trate. Elaborada con información tomada de: [62] P. M. Doran, *Bioprocess Engineering Principles*, 2nd ed., vol. 21. Elsevier, 1995. [Online]. Available:https://www.academia.edu/10346652/Bioprocess_Engineering_Principles_Pauline_M_Doran.

Gracias a que las cantidades de biomasa (*B. sacchari*), producto (PHB) y sustrato (glucosa), son conocidas por el balance de masa, d y e son conocidas en la **Ecuación 4.**, por lo tanto, es posible realizar el balance por elemento presente en ella y conocer los demás coeficientes estequiométricos, obteniendo entonces la ecuación Y, y, por ende, las cantidades de aire requeridas para cada biorreactor presente en el proceso de producción.

Ecuación 5.

Ecuación de la reacción bioquímica de *B. sacchari*



Nota: Se presenta la ecuación de la reacción bioquímica de *B. sacchari*. La fórmula empírica general para las bacterias ($CH_2O_{0,5}N_{0,25}$) fue tomada de: [62] P. M. Doran, *Bioprocess Engineering Principles*, 2nd ed., vol. 21. Elsevier, 1995. [Online]. Available: https://www.academia.edu/10346652/Bioprocess_Engineering_Principles_Pauline_M_Doran.

3.3.3. Downstream o extracción de PHB

La biomasa resultante de la fermentación es separada del medio gracias a centrifugación a 4000xg por 10 minutos a 4°C, tal como se hace en “Production of bioplastic (poly-3-hydroxybutyrate) using waste paper as a feedstock: Optimization of enzymatic hydrolysis and fermentation employing *Burkholderia Sacchari*”.

Aún así, este polímero, al desarrollarse como un metabolito intracelular, es decir, en el interior de la membrana del microorganismo, debe ser separado del mismo. Existen diversas técnicas para llegar a este objetivo que fueron mencionadas anteriormente en la sección de métodos de producción, sin embargo, los más utilizados involucran solventes como el cloroformo. Por ello, se buscan métodos que involucren reactivos menos agresivos ambientalmente, y tal es el caso de los usados en “Effect of different recovery strategies of P(3HB-co-3HHx) copolymer from *Cupriavidus necator* recombinant harboring the PHA synthase of *Chromobacterium* sp. USM2”, por lo que se toma como referencia en este proceso de producción.

Se suspende la biomasa previamente centrifugada en agua destilada a la que se agrega NaCl para realizar el pretratamiento a 30°C y 3h, después, se agrega NaOH y se agita la suspensión a 350rpm durante 1h. Finalmente, la suspensión es centrifugada por 45min a 6000rpm, lavada con etanol y secada [35].

3.3.4. Transformación de PHB

El método de transformación de PHB depende de la forma y el uso que se desee. Para obtener películas delgadas, el procesamiento por medio de altas temperaturas es una opción, sin embargo, su alto punto de fusión (175°C a 180°C) y baja temperatura de degradación (220°C) limita la posibilidad de preparar films de PHB [1]. Acercamientos como tratamiento de calor,

copolimerización, mezcla, y la adición de plastificantes han sido usados para mejorar la procesabilidad térmica. Usando una combinación de ellas, el PHB puede ser extruido, laminado o prensado en films teniendo buenas propiedades mecánicas [1]. Sin embargo, la mayoría de aditivos que mejoran el procesado térmico también puede reducir la tasa de biodegradación, incrementar costos, generar productos tóxicos por degradación o causar riesgos a la salud relacionados a la lixiviación de plastificantes [1].

Otra técnica existente es el solvent casting, que involucra disolver el polímero en un solvente apropiado y evaporar dicho solvente para obtener un film de alta calidad [1]. El solvent casting se realiza comúnmente con solventes como el cloroformo pero esto presentaría el mismo problema enunciado antes en la extracción, y, además, la alta afinidad entre este solvente y el PHB es tal que los tiempos de procesado son largos pues la evaporación es lenta y se corre el riesgo de que permanezcan trazas de cloroformo en el producto final [1].

A raíz de lo anterior, en “Tuning the properties of polyhydroxybutyrate films using acetic acid via solvent casting” usan ácido acético como solvente, y este método es el usado en el presente proceso. El PHB se mezcla con ácido acético a 80°C con agitación constante hasta que el polímero se disuelva completamente (60min). Enseguida, la mezcla se vierte en un vidrio precalentado a la misma temperatura para que suceda la evaporación del ácido acético durante 6min, obteniendo, finalmente films de PHB partiendo de residuos de papel de oficina.

3.4. Propiedades fisicoquímicas y mecánicas típicas del biofilm

Al seguir el proceso de producción de biofilms de PHB descrito en la sección anterior, y, teniendo en cuenta principalmente el proceso de transformación desde gránulos hasta películas biopoliméricas, que fue realizada de acuerdo a “Tuning the properties of polyhydroxybutyrate films using acetic acid via solvent casting” usando ácido acético como disolvente para la técnica de solvent casting en lugar de otros ampliamente conocidos como el cloroformo, es posible enunciar distintas propiedades mecánicas, térmicas y ópticas que podría presentar el producto según lo reportado en la literatura [1]. De esta forma, las características presentadas por el biofilm al procesar el PHB con ácido acético a 80°C (la referencia bibliográfica presenta una comparación a distintas temperaturas de procesamiento) son mostradas a continuación.

3.4.1. Pureza y composición

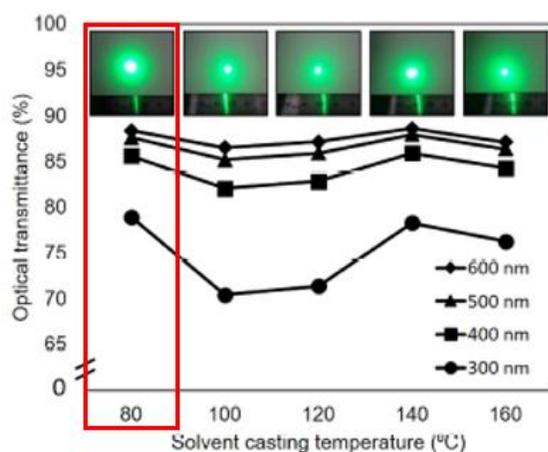
Mediante pruebas de espectroscopía con rayos X, calorimetría diferencial de barrido y análisis CHNS, se conoció que la proporción C:O estuvo dentro del 1% de la proporción teórica del PHB puro, la cual es de 1,5, que conlleva a establecer que se obtuvo un polímero con pureza en torno a 98-99% [1].

3.4.2. Apariencia

El biofilm se califica como translúcido, debido a que la luz detrás del objeto es visible mas no es transparente, como puede observarse en la **Figura 11.**, en el caso de la temperatura seleccionada. Además, también fue medida la transmitancia a distintas longitudes de onda, obteniendo valores de 79 hasta 89%, que pueden considerarse como cercanos a transparente teniendo en cuenta que 0% es un objeto totalmente opaco y 100% es el blanco. Esto también demuestra que su superficie es mínimamente irregular pues no dispersa a la luz que incide sobre la película [1].

Figura 11.

Transmitancia vs Temperatura de procesamiento (A distintas longitudes de onda).



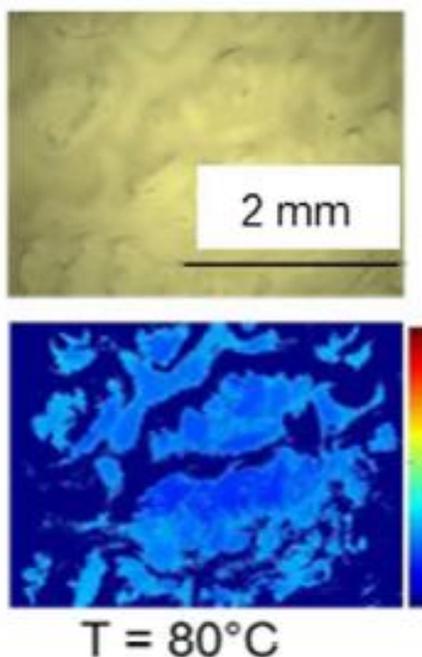
Nota. Se muestra la gráfica de Transmitancia vs Temperatura de procesamiento a 600, 500, 400 y 300nm junto con muestras fotográficas. Extraída y adaptada de [1] P. Anbukarasu, D. Sauvageau, and A. Elias, “Turning the properties of polyhydroxybutyrate films using acetic acid via solvent casting,” *Sci. Rep.*, vol. 5, p. 15, 2015, doi: 10.1038/srep17884. [Online]. Available: <https://cutt.ly/OI0OdBk>

Por otro lado, se denota mediante imágenes estereomicroscópicas (**Figura 12.**) que las muestras preparadas tienen una apariencia desigual o moteada. Se observa que existen distintas regiones en

las películas, unas ricas en polímero y otras pobres en él, esto se explica debido a que el ácido acético es un solvente pobre para el PHB, por lo que la separación de las fases de solvente y polímero sucede al igual que la formación de estas zonas a medida que el ácido acético se evapora. En la figura 12, estas ondulaciones pueden identificarse fácilmente ya que tiene un filtro coloreado.

Figura 12.

Imágenes estereomicroscópicas de las muestras finales de biofilm.



Nota. La figura muestra imágenes estereomicroscópicas del biofilm. Tomado de: [1] P. Anbukarasu, D. Sauvageau, and A. Elias, “Turning the properties of polyhydroxybutyrate films using acetic acid via solvent casting,” *Sci. Rep.*, vol. 5, p. 15, 2015, doi: 10.1038/srep17884. [Online]. Available: <https://cutt.ly/OI0OdBk>

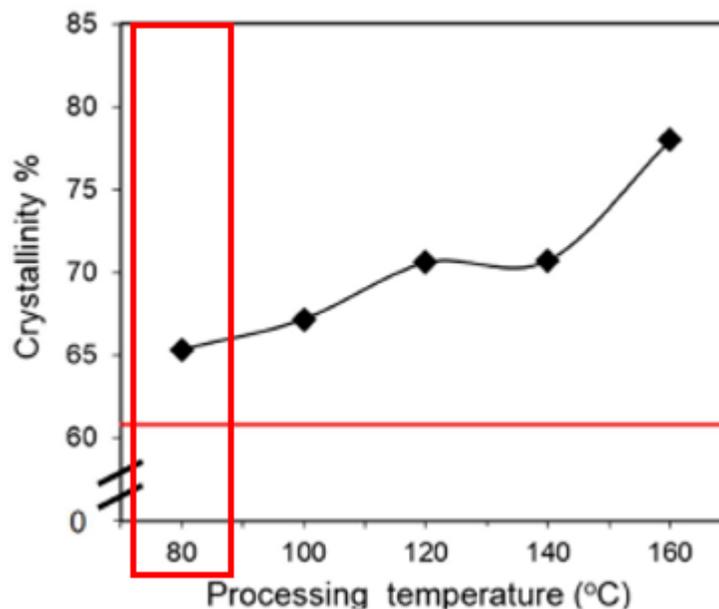
3.4.3. *Cristalinidad*

De acuerdo con el análisis experimental realizado, la cristalinidad del PHB procesado a 80°C es de 64%, que es la menor de todas las muestras preparadas en el estudio con ácido acético y un poco mayor a la del cloroformo de 60,5% (**Figura 13.**) [1]. Este último hecho se atribuye a que la película fabricada con ácido acético es producida a una mayor temperatura que la del cloroformo, por lo tanto, tiene más energía que puede ser utilizada en la formación de estructuras cristalinas; y, además, el cloroformo al ser más afín al polímero aumenta la posibilidad de que queden residuos

de este, lo que disminuye la reorganización en cristales [1]. Este aspecto es de importancia porque una cristalinidad elevada denota un material que puede ser duro pero frágil mecánicamente.

Figura 13.

Cristalinidad vs Temperatura de procesamiento.



Nota. La figura muestra el porcentaje de cristalinidad de las muestras procesadas a distintas temperaturas. La recta roja se refiere a una muestra referencia preparada con cloroformo. Extraída y adaptada de [1] P. Anbukarasu, D. Sauvageau, and A. Elias, “Turning the properties of polyhydroxybutyrate films using acetic acid via solvent casting,” *Sci. Rep.*, vol. 5, p. 15, 2015, doi: 10.1038/srep17884. [Online]. Available: <https://cutt.ly/OI0OdBk>

3.4.4. Degradación térmica

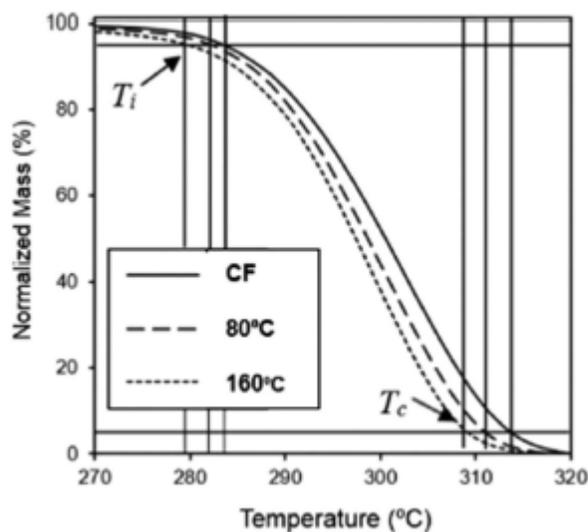
Puesto que el uso de ácido acético puede provocar degradación ácida del PHB, que puede ser acelerada por la alta temperatura de procesamiento manejada, y que a su vez puede disminuir la estabilidad térmica, este es un aspecto importante a corroborar [1].

Según la **Figura 14.**, la temperatura inicial de degradación es de 283°C, mientras que la de degradación completa fue de 312°C, valores mayores que los procesados a mayor temperatura, pero un poco menor a las que en las que se usó cloroformo. Esto puede deberse a una ligera degradación del polímero, que conlleva a una pequeña reducción de masa molecular que sucede en el proceso de disolución, sin embargo este fenómeno no es sustancial y no causa efectos

adversos más que esa pequeña reducción en las temperaturas de degradación [1]. Respecto a la exposición térmica, al realizarse en mínimos periodos de tiempo, no genera efectos perceptibles. Por último, cabe resaltar que la temperatura inicial de degradación se refiere al 95% de masa normalizada mientras que la temperatura de degradación completa corresponde al 5% de masa normalizada en las muestras [1].

Figura 14.

Determinación de temperatura de degradación inicial y completa.



Nota. Se muestra la figura que permite visualizar las temperaturas de degradación para tres muestras distintas. Tomado de: [1] P. Anbukarasu, D. Sauvageau, and A. Elias, “Turning the properties of polyhydroxybutyrate films using acetic acid via solvent casting,” *Sci. Rep.*, vol. 5, p. 15, 2015, doi: 10.1038/srep17884. [Online]. Available: <https://cutt.ly/gI0OixQ>

3.4.5. Comportamiento de fusión

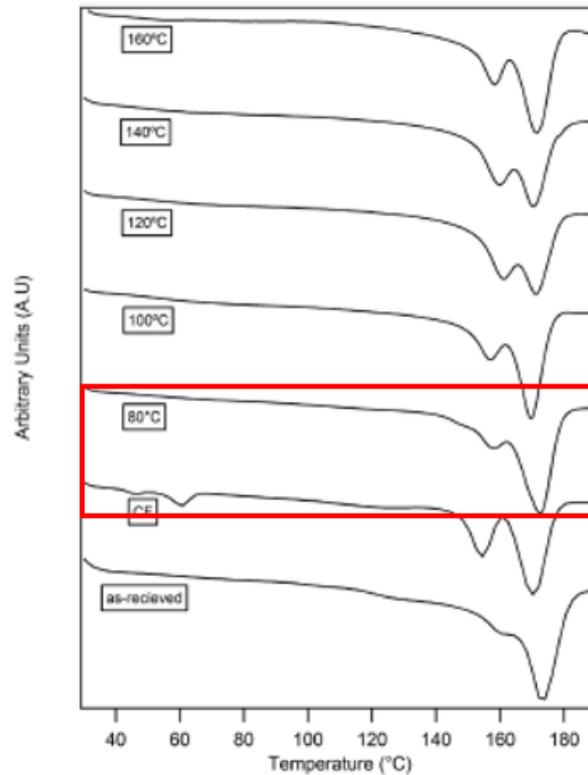
Se generaron las curvas de fusión mediante calorimetría diferencial de barrido, mostrando dos picos distintos visibles en la **Figura 15**. Este doble comportamiento de fusión es común en materiales poliméricos y se explica de acuerdo con el modelo de recristalización y fusión observado por el cambio de forma de las endotermas a diferentes velocidades de calentamiento [1].

Gracias a esta prueba, también se muestra que, en general, todas las muestras contienen una mezcla de cristales estables y metaestables. Sin embargo, la biopelícula de 80°C posee una menor

cantidad de cristales metaestables respecto a la preparada por cloroformo, esto explicado por la baja temperatura a la que se procesa que limita la energía disponible para el reordenamiento. Además, la rápida evaporación de solvente provoca que la superficie obtenida sea menos uniforme [1].

Figura 15.

Curvas de fusión de muestras de PHB.



Nota. Se observan las curvas de fusión de muestras de PHB. Extraída y adaptada de [1]. P. Anbukarasu, D. Sauvageau, and A. Elias, “Turning the properties of polyhydroxybutyrate films using acetic acid via solvent casting,” *Sci. Rep.*, vol. 5, p. 15, 2015, doi: 10.1038/srep17884. [Online]. Available: <https://cutt.ly/OI0OdBk>

3.4.6. Propiedades mecánicas

En la investigación tratada, se realizaron pruebas para el esfuerzo al fallo, tensión máxima, módulo de Young y una prueba de esfuerzo, que se puede ver como la cuarta gráfica de la **Figura 14.**, en esta, a 10MPa aproximadamente, la muestra pasa de la zona elástica a la plástica, donde el material ya no puede recuperar su forma original, después de dicha zona, se llega al punto de

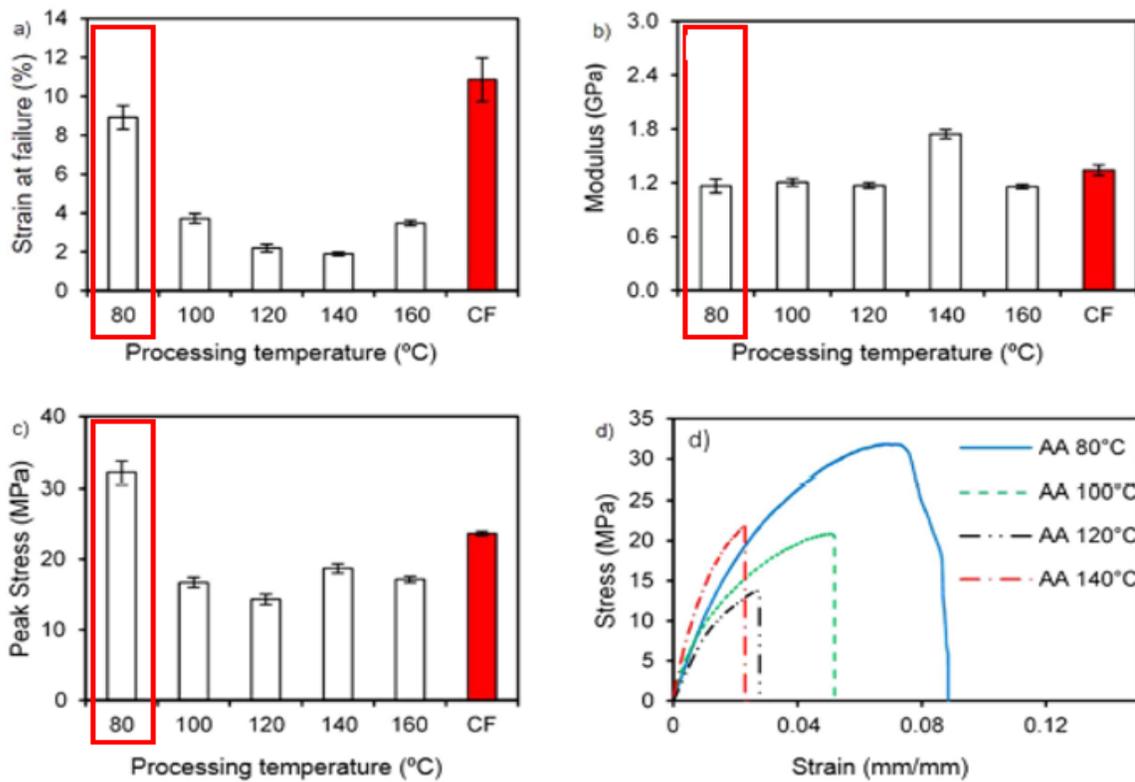
ruptura, a 32MPa aproximadamente, llegando a un alargamiento de 0,09mm/mm, acorde también al esfuerzo al fallo.

Esta última propiedad mencionada es de aproximadamente 9%, y es mayor a esta temperatura ya que se genera una menor cristalinidad, mientras que el de cloroformo es de 11%. El módulo de Young, cuenta con un valor de 1,2GPa, y por su parte, la tensión máxima cuenta con un valor muy alto respecto a las demás muestras, el cual fue de 33MPa aproximadamente. Estos resultados, que pueden ser visualizados en la **Figura 16.**, son principalmente fruto de la baja cristalinidad, e, incluso, a la actuación del ácido acético como plastificante sobre el PHB [1].

En general, las propiedades obtenidas por el biofilm de 80°C son mayores respecto a los producidos a las demás temperaturas y a su vez comparables con los producidos con cloroformo.

Figura 16.

Distintas propiedades mecánicas de muestras de biofilms de PHB.



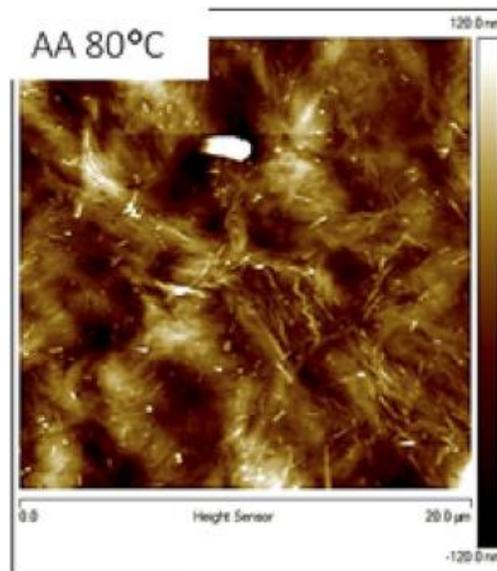
Nota. En la figura se muestran gráficas de alargamiento a la rotura (a), módulo de Young (b), tensión máxima (c) y tensión vs alargamiento (d). Extraída y adaptada de [1] P. Anbukarasu, D. Sauvageau, and A. Elias, “Turning the properties of polyhydroxybutyrate films using acetic acid via solvent casting,” *Sci. Rep.*, vol. 5, p. 15, 2015, doi: 10.1038/srep17884. [Online]. Available: <https://cutt.ly/OI0OdBk>

3.4.7. Morfología de la superficie y rugosidad

A 80°C, se obtuvieron biofilms de PHB fibrosos, con estructuras similares a agujas en la superficie, que se presentan con más frecuencias respecto a los procesados a altas temperaturas, además de una rugosidad en el rango de 20nm. Este fenómeno, puede ser explicado nuevamente con la menor energía entregada al material para reorganizarse, por lo tanto, se presentan más regiones amorfas en la superficie [1]. Lo anterior se puede evidenciar en la **Figura 17.**, que es un escaneo microscópico del producto en un área de 20µm².

Figura 17.

Escaneo microscópico del biofilm.



Nota. Se observa un área escaneada del biofilm preparado a 80°C mediante microscopía de fuerza atómica. Tomado de: [1] P. Anbukarasu, D. Sauvageau, and A. Elias, “Turning the properties of polyhydroxybutyrate films using acetic acid via solvent casting,” *Sci. Rep.*, vol. 5, p. 15, 2015, doi: 10.1038/srep17884. [Online]. Available: <https://cutt.ly/OI0OdBk>.

En la **Tabla 15.**, es posible observar una recopilación de las características y propiedades obtenidas en las pruebas realizadas en “Tuning the properties of polyhydroxybutyrate films using acetic acid via solvent casting”.

Tabla 15.

Resultados obtenidos en las pruebas realizadas en biofilms de PHB transformados por solvent casting con ácido acético.

Propiedad	Valor o descripción	Pruebas realizadas
Pureza (%)	98-99	Espectroscopía con rayos X; calorimetría diferencial de barrido; análisis CHNS.
Transparencia	Translúcido	Incidencia de haz de luz láser.
Transmitancia (%)	79-89	Transmitancia óptica con longitudes de onda de 300, 400, 500 y 600nm.
Apariencia	Clara y moteada. Superficie mínimamente irregular	Incidencia de haz de luz láser; inspección estereomicroscópica.
Cristalinidad (%)	64	Difracción de rayos X.
Punto de fusión (°C)	180	Espectroscopía con rayos X; calorimetría diferencial de barrido; análisis CHNS.
Degradación térmica inicial (°C)	283	Análisis termogravimétrico.
Degradación térmica total (°C)	312	Análisis termogravimétrico.
Cristalización	Cristales estables y metaestables	Calorimetría diferencial de barrido.
Alargamiento a rotura (%)	9	Ensayos en probetas rectangulares de 25mm x 5mm x 8µm aproximadamente con tester Instron 5943 con célula de carga de 1kN.
Módulo de Young (GPa)	1,2	Ensayos en probetas rectangulares de 25mm x 5mm x 8µm aproximadamente con tester Instron 5943 con célula de carga de 1kN.
Esfuerzo de tracción (MPa)	32	Ensayos en probetas rectangulares de 25mm x 5mm x 8µm aproximadamente con tester Instron 5943 con célula de carga de 1kN.
Rugosidad (nm)	20	Análisis con microscopio de fuerza atómica.
Morfología de la superficie	Fibrosa	Análisis con microscopio de fuerza atómica.

Nota. La tabla muestra el valor o descripción de distintas propiedades y las pruebas realizadas para obtenerlas. Elaborada con la información Tomado de: [1] P. Anbukarasu, D. Sauvageau, and A. Elias, "Turning the properties of polyhydroxybutyrate films using acetic acid via solvent casting," *Sci. Rep.*, vol. 5, p. 15, 2015, doi: 10.1038/srep17884. [Online]. Available: <https://cutt.ly/OI0OdBk>

3.5. Comparación del Biofilm de PHB con algunos plásticos

El PHB presenta propiedades similares a algunos otros plásticos, como el polipropileno. Distintos autores afirman que estas características son tanto físicas como mecánicas. El PHB también se asemeja al polietileno en las propiedades termomecánicas y con el ácido poliláctico en relación con las mecánicas [52]. Por lo tanto, y en relación con lo mostrado en la sección anterior, se realiza una comparación de los valores de las propiedades presentadas por otros plásticos con el objetivo de reconocer si el bioplástico obtenido es similar a alguno de ellos y así establecer que es capaz de suplirlos en sus actividades.

3.5.1. Polipropileno (PP)

El polipropileno es un polímero termoplástico que presenta excelente resistencia química e inocuidad ante compuestos orgánicos y ácidos, siendo así de aplicación para la industria alimentaria, posee buena rigidez, dureza y resistencia superficial; logrando así una buena estabilidad dimensional [63].

De acuerdo a lo reportado en la ficha técnica de este plástico presentada por la Corporación Emacin, en [63], en general, el presenta propiedades mecánicas y térmicas parecidas a las del PHB, pues su módulo de Young es cercano, así como el esfuerzo de tracción. Asimismo, la temperatura de transición vítrea se encuentra en torno a los 0°C en ambos casos, por lo que tanto el PP como el PHB tienen un comportamiento plástico, gomoso y flexible a temperaturas típicas de uso, es decir, temperaturas ambientales estándar.

Sin embargo, puede notarse una marcada diferencia principalmente en el alargamiento a rotura, que en el caso del PHB es de tan solo 9% y para el PP llega hasta 400%, esto impediría que las biopelículas desempeñaran actividades en las cuales el PP se somete a estiramientos muy grandes. Por otra parte, la temperatura de degradación inicial en el polipropileno es mayor, en un rango de 330 a 380°C[64], mientras que para su contraparte es de 283°C.

En el aspecto en el que el PHB se encuentra en desventaja con el PP, y en el que este material destaca, es su resistencia química, ya que el primero tiene resistencia aceptable por ácidos y es fácilmente atacado por álcalis [65], mientras que el segundo resiste de forma aceptable ácidos y

álcalis. A pesar de esto, ambos son aceptablemente resistentes a alcoholes y muy buenos frente a grasas y aceites [63], [65], e insolubles en agua [66].

3.5.2. Polietileno de baja densidad (PEBD)

El polietileno es uno de los plásticos convencionales más extendidos en el uso diario, pertenece al grupo de las poliolefinas y es químicamente inerte [67]. Se encuentra extendido en el mercado como polietileno de alta o baja densidad, puesto que cada uno presenta propiedades específicas distintas que determinan su aplicación.

El polietileno de alta densidad se caracteriza por su tenacidad y rigidez para el proceso de soplado y extrusión cuya oferta se destina para aplicaciones como envases lácteos, cosméticos, detergentes, envases para productos químicos, mercancías peligrosas y derivados del petróleo. También se emplea en la fabricación de bolsas, e incluso, tuberías de presión así como para tuberías de saneamiento, drenaje y protección de cables [67].

Por su parte, el polietileno de baja densidad ofrece propiedades como una buena resistencia al impacto, una muy buena procesabilidad, resistencia térmica y química y flexibilidad. Los films producidos a partir de este polímero se caracterizan por la claridad, rigidez y densidad para un excelente acabado. Se emplea en fabricación de films para envases y embalajes, como film retráctil, film industrial, laminación, envasado de alimentos y sacos; también en la fabricación de cubiertas para cables de telecomunicación y energía [67]. Además, se usa en la manufactura de juguetes.

Al comparar el PEBD frente al PHB, es de resaltar que el primero posee propiedades mecánicas superiores al segundo, ya que su módulo de Young es mayor en más de un orden de magnitud y el alargamiento a la rotura es incomparable ya que el PEBD llega al 635% [68], mientras que el PHB es de tan solo 9% [1]; aun así, este último cuenta con un esfuerzo de tracción mayor, lo que quiere decir que soporta una tensión más alta. Respecto a lo relacionado con la temperatura, ambos se encuentran por encima de la temperatura de transición vítrea en condiciones de trabajo, pero el punto de fusión del PEBD (105-115°C [69]) es mucho más bajo al del PHB (173-180°C [52]), por lo que puede que no sea posible usarlo a temperaturas igual de altas. Adicionalmente, el rango entre esta última propiedad y la temperatura de degradación térmica es mucho más grande,

entonces, el procesamiento del PEBD es más sencillo, ya que no requiere un manejo de la temperatura tan riguroso como sucede con el PHB.

3.5.3. Ácido Poliláctico (PLA)

El ácido poliláctico es un poliéster termoplástico biodegradable que actualmente, tal como lo hace el PHB, ha despertado gran interés para competir frente a los plásticos producidos a partir de derivados del petróleo. Puede ser producido por vía química o biológica, realizando la fermentación de sustratos ricos en carbohidratos por microorganismos [70].

Normalmente, es comparado con el polietileno tereftalato (PET), por lo que se busca dar uso en situaciones similares como la producción de botellas, bolsas y otro tipo de envases alimentarios, también se utiliza en el sector textil para fabricación de algunas telas, en el médico para implantes y suturas, y también para la impresión 3D, aplicación que se ha difundido ampliamente en el último tiempo [71].

Si se compara el PLA con el PHB, se puede ver que el PLA tiene propiedades mecánicas un poco mayores, puesto que su módulo de Young se encuentra en un rango de 3 a 4GPa y el esfuerzo de tracción está en uno de 40-60MPa [70], sin embargo, su alargamiento a la rotura es incluso más bajo que el del PHB (en torno al 3 a 6% [72]). Por otro lado, su temperatura de transición vítrea es mucho más alta que temperaturas típicas ambientales, esto provoca que, a estas condiciones, se comporte como un material rígido y duro como cristal, caso contrario al PHB que es flexible y plástico. Además, si bien su punto de fusión es muy similar, al ser la temperatura de transición vítrea del PLA entre 60 y 62°C [73], si en su uso se calienta, este puede empezar a cambiar sus condiciones y afectar la actividad para la que se está utilizando, algo que sería muy probable, por ejemplo, al fabricar envases de alimentos de este polímero.

A modo de resumen, se puede visualizar la **Tabla 16.**, que permite comparar distintas propiedades mecánicas y térmicas del PHB con los plásticos anteriormente tratados. De acuerdo a esto, se puede decir que el PHB tiene características equiparables a los otros polímeros con los que es comúnmente comparado, pues tiene una densidad muy similar, así como una temperatura de transición vítrea próxima a la del PP y PEBD que le permite comportarse como un material plástico a temperatura ambiente, además, puede llegar a temperaturas de servicio relativamente altas.

Respecto a las propiedades mecánicas, se asemeja de gran forma al PP, por lo que los posibles usos de la biopelícula obtenida pueden ser encaminados a competir con este plástico convencional. Sin embargo, el alargamiento a la rotura tan bajo en relación al de los plásticos comunes analizados limita sus aplicaciones.

Otro punto importante es su bajo punto de degradación térmica, que condiciona su procesamiento, en especial para operaciones como la extrusión y la inyección, por ello, es necesario buscar otras estrategias para su transformación, como lo puede ser la técnica solvent casting, utilizada en el proceso de producción tratado anteriormente.

Tabla 16.

Algunas propiedades del PHB y otros plásticos.

Propiedad	PHB [52], [1]	PP [63], [64]	PEBD [68], [69], [74]	PLA [70], [72], [73]
Densidad (g/cm ³)	1,23	0,9	0,922	1,24
T fusión (°C)	180	164	105-115	153
T transición vítrea (°C)	0-7	0-(-10)	-125	60-62
Degradación térmica (°C)	283	330-380	414	325-338
Alargamiento a rotura (%)	9	400	635	3-6
Módulo de Young (GPa)	1,2	1,34	25	3-4
Esfuerzo de tracción (MPa)	32	33	10,9	40-60

Nota. La tabla muestra la densidad y algunas propiedades térmicas y mecánicas del PHB, PP, PEBD y PLA extraídas de diversas fuentes.

3.6. Usos del biofilm

Según lo mostrado anteriormente, el producto puede ser útil en distintos campos del mercado de los plásticos, puesto que tiene características comparables con los otros polímeros tratados, en especial con el PP, por ello, los usos son recomendados considerando las aplicaciones de este plástico convencional, sin embargo, se debe tener en cuenta que se ven limitados por la gran diferencia que tienen en el alargamiento a rotura el PP y el PHB (400 y 9%, respectivamente).

Algunas fuentes recomiendan el uso de estas biopelículas como envolturas [52], para la protección y embalaje de distintas piezas que no requieran de un cuidado especial. También, pueden ser para productos listos para su comercialización, usándolo como el empaque que se

encuentra en contacto directo con el producto, puede ser para dispositivos electrónicos o las piezas que los acompañan como repuestos o elementos complementarios, que normalmente vienen separadas del producto principal y el usuario debe ponerlas en él cuando desee hacer uso de ellas, como el ejemplo mostrado en la **Figura 18**.

Figura 18.

Plástico usado para empaclar elementos complementarios para dispositivos electrónicos.



Nota. La figura muestra el plástico usado para empaclar cables y otros productos usados junto a dispositivos electrónicos. Tomado de: [75] DH gate, “Compre Con El Paquete De La Caja Al Por Menor Empaque Para Los Cables Del Cargador De Datos Línea 1m Cable USB Calidad OEM Original Samsung S7 S8 S9 S9 Nota 9 8 7 Huawei P A 0,91 € Del Alice_wedding_dress | Es.Dhgate.Com,” 2021. [Online]. Available: <https://www.amazon.com/-/es/auténtico-Samsung-cargador-adaptativo-rápido/dp/B017T28DIM>.

Adicionalmente, puede ser usado como envoltura para todo tipo de productos [76] que no necesiten de un empaque totalmente transparente o resistente al alargamiento, que tan solo se usen para facilitar su transporte o para establecer la unidad de venta, como pueden ser tapabocas u otras prendas para vestir y productos textiles como medias, gorros, camisetas [76]; productos de papelería como hojas, lápices, tajalápices, borradores y reglas; accesorios para el cabello como moñas, balacas y hebillas, etc. Algunos de los anteriores se pueden observar en la **Figura 19**.

Figura 19.

Productos empacados en plástico.



Nota. Se muestran distintos productos en empaques de plástico. Extraído de [77]–[79].

Otra alternativa para su uso son las bolsas, utilizadas para cargar objetos de un punto a otro [76], estos deben ser, idealmente, de peso bajo a moderado para que en el momento de uso no corra el riesgo de romperse.

Por último, este biofilm también podría usarse para la formación de empaques de alimentos [52], en específico el packaging primario [80], que es el empaque que se encuentra en contacto directo con el alimento, y que, comúnmente, se encuentra contenido en el packaging secundario que tiene la imagen llamativa del producto e información como su tabla nutricional. Ejemplos de estos pueden ser empaques de cereales, galletas, dulces, entre otros (**Figura 20**).

Figura 20.

Packaging primario en alimentos.



Nota. Se muestra el packaging primario usado en diversos alimentos. Extraído de [81], [82].

Los usos anteriormente descritos se encuentran en línea con los reportados en otras revisiones bibliográficas, donde se sugieren aplicaciones en diversos campos entre los que se encuentran los empaques de comida, bolsas, botellas, productos desechables, envolturas [52], entre otros que pueden observarse en la **Tabla 11**.

Es necesario decir que, para el aprovechamiento del producto en las formas anteriormente mencionadas, es necesario el uso de técnicas de procesamiento de polímeros, como, por ejemplo, el termosellado, que utiliza el calor para sellar el plástico requerido.

3.7. Equipos

Los equipos mostrados a continuación fueron seleccionados en línea con los requerimientos de las distintas operaciones descritas anteriormente como la carga y volumen de trabajo (condiciones determinadas mediante el desarrollo del balance de masa expuesto en el Anexo 1) y las descritas en el apartado de condiciones de trabajo de equipos. Se realizó una consulta en diferentes interfaces de compañías de manufactura y distribución de equipamiento a nivel internacional, se seleccionó el equipo adecuado para el proceso y se realizó una descripción de las características fundamentales de la maquinaria como se muestra a continuación.

3.7.1. SR-101: Trituradora

Máquina trituradora de papel para oficina DT-200C, la cual produce un tamaño de partícula de 4x40mm aproximadamente, tiene una capacidad de 78L y máxima capacidad de 80g por pasada. El equipo tiene una potencia de 430W/180W. Se escoge este equipo, que se muestra en la **Figura 21**., con las características mencionadas teniendo en cuenta el volumen de papel a trabajar por lote, que sería en torno a los 36,5L [83].

Figura 21.

Trituradora de papel DT200C.



Nota. La figura muestra la trituradora de papel DT200C fabricada por la empresa New United. Tomado de: [83] Alibaba.com, “Dt-200c /dt-200c+ 22sheets Cross Cut 3.9x38mm Continous Paper Shredder Machine For Office Or Personal - Buy 22sheets Cross Cut 3.9x38mm Continous Paper Shredder Machine For Office Or Personal,22sheets Cross Cut 3.9x38mm Paper Shredder Machine,Paper Shredd,” 2021. [Online]. Available: https://www.alibaba.com/product-detail/DT-200C-DT-200C-22sheets-cross_62129851482.html.

3.7.2. M-101, M-102: Mezcladores

Mezcladores por agitación de planta piloto de la marca Qiangzhong, están hechos de acero inoxidable 304, 304L o 316. Cuentan con una capacidad de 200L (M-101) y 500L (M-102); potencia de motor de 0,75kW; diámetro nominal de 0,55 y 0,8m; y velocidad de agitación de 24 a 120rpm. Además, están provistos de una chaqueta eléctrica que permite realizar calentamiento a la mezcla [84]. Estos equipos tienen una potencia de 18kW [84] y una muestra de ellos puede apreciarse en la **Figura 22**.

Figura 22.

Mezclador de planta piloto



Nota. La figura muestra el mezclador de planta piloto marca Qiangzhong. Tomado de: [84] Alibaba.com, “Small Food Beverage Liquid Pharmaceutical Pilot Plant Mixer Ss Cone Bottom Fluid Sterile Stainless Steel Mixing Vessel - Buy Pharmaceutical Mixing Vessels, Sterile Mixing Vessel, Liquid Food Beverage Mixing Vessel,” 2021. [Online]. Available: <https://www.alibaba.com/showroom/sterile-mixing-vessel.html>.

3.7.3. *DE-101: Secador*

Un secador de bandejas CT-C-O que usa aire caliente para secar y retirar la humedad de distintos sólidos por lotes, cuenta con una capacidad de 60kg/lote gracias a 24 bandejas, un flujo de aire de 3450m³/h, capacidad de evaporación de 500kg/h y dimensiones de 1,4m de largo, 1,2m de ancho y 2m de alto [85], que pueden observarse en la **Figura 23**. Su fuente de calentamiento puede ser vapor, electricidad, agua caliente o gases generados por combustibles o biomasa. Su potencia es de 0,45kW [85].

Figura 23.

Secador de bandejas CT-C-O



Nota. Se muestra el secador de bandejas CT-C-O fabricado por Doing Machine. Tomado de: [85] Alibaba.com, “Industrial Hot Air Tray Dryer - Buy Tray Dryer,Industrial Tray Dryer,Hot Air Dryer,” 2021. [Online]. Available: https://www.alibaba.com/product-detail/Industrial-hot-air-tray-dryer_60429893034.html.

3.7.4. SR-102: Molino

Se trata de un molino multiusos con dimensiones 1,02x0,67x1,09m, fácil de utilizar gracias a su sistema único de soporte de cuchillas, es una máquina especializada en la molienda de materiales delgados en gran cantidad, lo cual mejora la eficiencia del proceso al poder procesar hasta 400 kg/h. Con una velocidad de rotación de 520rpm y una potencia de 15 kW [86]. (**Figura 24.**).

Figura 24.

Plastic crusher fabricado por Guangzhou Tyrone plastic machine co



Nota. Se muestra el molino plastic crusher fabricado por Guangzhou Tyrone plastic machine co. Tomado de: [86] Tubo De Plastico - Buy Triturador De Tubo De Plastico,Trituradora De Plastico,Molino Triturador De Plasticos,” 2021. [Online]. Available: <https://bit.ly/3tThDXM>.

3.7.5. R-102: Biorreactor

Reactor de vidrio de borosilicato con chaqueta usado principalmente para la síntesis de materiales, destilación, concentración, etc. Tiene una capacidad de 1L, rango de temperatura de trabajo de 0 a $200^{\circ}\text{C} \pm 0,2^{\circ}\text{C}$ dependiendo del fluido calefactor o refrigerante, también cuenta con sistema de agitación de hasta 600rpm y potencia de 1,5kW [87]. (**Figura 25.**)

Figura 25.

Reactor F-1



Nota. Se muestra el reactor de vidrio con chaqueta F-1 fabricado por YUHUA. Tomado de: [87] Alibaba.com, “1-5l Single Layer Glass Reactor - Buy Single Layer Glass Reactor,Glass Reactor,” 2021. [Online]. Available: https://www.alibaba.com/product-detail/5L-Single-layer-glass-reactor_62395527052.html.

3.7.6. R-103, R-104, R-105: Biorreactor

Reactores de vidrio de borosilicato multiusos ideal para trabajos de química fina, biofarmacéutica y la síntesis, prueba y producción de nuevos materiales, con volúmenes de 5, 30 y 200L, según el modelo, con una potencia de 90W-750W. Cuentan con una velocidad de agitación de hasta 1200rpm, pueden trabajar a temperaturas entre -120 hasta 300°C [88]. (**Figura 26.**).

Figura 26.

Reactor de vidrio de laboratorio 1L-200L.



Nota. Se muestra el reactor de vidrio de laboratorio que puede tener capacidades entre 5L a 200L. Tomado de: [88] Alibaba.com, “Reactor De Vidrio De Laboratorio,5l,10l,20l,50l,100l,200l,Cbd,Químico,Capa Única,Calefacción De Agitación,Reactor De Vidrio - Buy Single Layer Electric Agitated Heating Glass Reactor With Best Price,Cbd Extraction Chemical Single Layer Glass Reactor With .” 2021. [Online]. Available: <https://m.japanese.alibaba.com/p-detail/Laboratory-Glass-Reactor-5L-10L-20L-1600209579029.html>.

3.7.7. FF-101, FF-102: Centrifuga

Máquinas que utilizan fuerza centrífuga para separar las partículas sólidas o los componentes en una mezcla líquido- líquido. La separación ocurre gracias a que, al rotar, el líquido traspasa el filtro de la cesta y es recolectado, mientras que la fase sólida se retiene en dicha cesta. Principalmente usadas en la industria alimentaria. La centrífuga modelo LGZ/PGZ1500 (FF-101) y PGZ1200-N (FF-102) fabricadas en acero inoxidable, tienen, respectivamente, un diámetro de 1,25m y 1,2m; volumen de 500 y 350L; capacidad de 600 y 450kg; velocidad de hasta 1200 y 1000rpm; y potencia de 22/30 kW [89], [90].(Figura 27.).

Figura 27.

Centrifugadora industrial automática PGZ



Nota. Se muestran centrifugadoras industriales PGZ, fabricadas por Zhongyi. Tomado de: [89] Alibaba.com, “Pgz Automatic Food Industrial Centrifuge With Model Pgz-800 - Buy Food Industrial Centrifuge, Automatic Food Centrifuge, Food Centrifuge,” 2021. [Online]. Available: https://www.alibaba.com/product-detail/PGZ-800-Automatic-Bottom-Discharge-Centrifuge_60804451589.html.

3.7.8. L-101: Filtro de membrana

Filtro de bolsa YT-1D en acero inoxidable que trabaja a presión entre 0,5 y 1,6MPa, con un área de filtración de 0,25m² y un flujo máximo de trabajo de 20000L/h. Posee una bolsa de filtrado en su interior con un calibre de 0,5µm [91]. (**Figura 28.**). Estos equipos se caracterizan por poseer una alta capacidad a pesar de ser de un tamaño reducido, y es que si bien el flujo máximo de trabajo hace parecer que el filtro está sobredimensionado para la carga que recibe para realizar la operación en este proceso de producción, es uno de los de menores dimensiones reportados en el mercado por el mismo fabricante, como puede verse en [91]. Algo que se corrobora al tener en cuenta el área de filtración de tan solo 0,25m².

Figura 28.

Filtro de bolsa YT-1D



Nota. Se muestra el filtro de bolsa fabricado por YATE. Tomado de: [91]. Alibaba.com, “Liquid/oil/wine/beer/honey/syrup/paint Filtration Machine Stainless Steel 304 Multi Bag Filter Housing - Buy Filter Housing, Bag Filter Housing, Stainless Steel Filter Housing,” 2021. [Online]. Available: https://www.alibaba.com/product-detail/Liquid-oil-wine-beer-honey-syrup_1600171069983.html.

3.7.9. DE-102 A/D: Placas de calentamiento

Placa calefactora eléctrica PLD-6018, fabricada en aluminio con dimensiones de 60x60cm. Temperatura ajustable desde 50 hasta 350°C con precisión de $\pm 1^\circ\text{C}$ y uniformidad de $\pm 2^\circ\text{C}$. Excelente distribución de temperatura y resistencia a productos químicos y golpes. Cuenta con un sistema de control digital y tiene una potencia de 1,9kW [92]. (**Figura 29.**). Dicha placa será la encargada de eliminar el ácido acético presente en el biofilm mediante el calentamiento hasta la evaporación de la sustancia, el equipo fue seleccionado teniendo en cuenta que en una maquinaria de calentamiento o secado diferente como un secador no sería posible controlar la temperatura de la superficie que entra en contacto con la biopelícula de PHB, condición que es indispensable para evitar la alteración de propiedades finales del biofilm.

Figura 29.

Placa calefactora PLD-6018



Nota. Se muestra la placa calefactora PLD-6018 fabricada por ACEQ laboratorios. Tomado de: [92] ACEQ Laboratorios, “Placa De Calentamiento PLD-6018 60x60 | Aceq Laboratorios,” 2021. [Online]. Available: <https://aceqlaboratorios.com.co/producto/equipos-para-laboratorio/planchas/placa-de-calentamiento-pld-6018/>.

3.7.10. R-101, R-106, R-107: Biorreactor

Biorreactores de acero inoxidable con capacidad de 2000L (R-101, R-107) y 500L (R-106) de capacidad, con un espesor de pared de al menos 3mm y que pueden trabajar a presiones entre 0,1 a 1,6MPa, así como a temperaturas de -4 a 150°C. Están dotados de un agitador. Poseen unas dimensiones de 1,5 y 0,9m de diámetro y 1,2 y 0,8m de altura, además de una potencia de 1,5 y 0,55kW [93], respectivamente. (**Figura 30.**)

Figura 30.
Bioreactor KS



Nota. Se observa una muestra de un biorreactor KS fabricado por Kosun Fluid. Tomado de: [93] 1000l Price Pharmaceutical Industrial Bioreactor - Buy Chemical Reactor Vessel, Batch Reactor 1000l Price, Pharmaceutical Industrial Bioreactor,” 2021. [Online]. Available: <https://bit.ly/3fRSbK3>.

3.7.11. M-103: Mezclador

Mezclador cilíndrico por agitación hecho de acero inoxidable con capacidad de 10L. Está provisto de un motor, vara y aspas de mezclado que giran a altas velocidades, permitiendo el mezclado de las sustancias alojadas en él [94]. Su potencia es de 0,34kW [94], un ejemplo del equipo puede apreciarse en la **Figura 31**.

Figura 31.

Tanque de mezclado de acero inoxidable



Nota. Se muestra un tanque de mezclado de acero inoxidable fabricado por la marca Amixer. Tomado de: [94] Alibaba.com, “20l 30l 50l 200l 500l 1000l Stainless Steel Liquid Mixing Tank - Buy Mixing Tank 3000 L Agitator, Mixing Tank 20l, 200 Liter Mixing Tank,” 2021. [Online]. Available: https://www.alibaba.com/product-detail/20L-30L-50L-200L-500L-1000L_1600235862236.html.

3.7.12. M-104: Mezclador

Mezclador de acero inoxidable 304 o 316. Tiene una capacidad de 30L con un diámetro de 0,4m rodeado por una chaqueta de 0,5m de diámetro. Está equipado con un motor de 0,55kW y puede trabajar hasta a 120rpm [95]. El equipo puede apreciarse en la **Figura 32**.

Figura 32.

Mezclador de acero inoxidable enchaquetado de 30L



Nota. Se muestra el mezclador de acero inoxidable enchaquetado fabricado por Suote. Extraído de [95] Alibaba.com, “20l 30l 50l 100l Electric Heating And Mixing Jacketed Stainless Steel Reactor Sus304 /316l Tank Mixer - Buy Electric Heating And Mixing Tank Mixer,Tank Mixer,Mixing Tank Mixer,” 2021. [Online]. Available: https://www.made-in-china.com/products-search/hot-china-products/Stainless_Steel_Reaction_Vessel.html.

3.8. Condiciones de trabajo de equipos

El equipo en el que se realiza cada operación unitaria y las condiciones necesarias para su desarrollo cada caso, son mostradas en la **Tabla 17.**, a continuación:

Tabla 17.*Equipos y condiciones de operación*

Operación	Código	Equipo	Volumen (L)	Temperatura (°C)	Agitación (rpm)	Tiempo (h)	Potencia (kW)
Trituración	SR-101	Trituradora	78	13,1	-	0,17	0,43
Molienda	SR-102	Molino	745 (total)	13,1	520	0,08	15
Pretratamiento papel	M-101	Mezclador	200	121	50	0,50	18
Lavado	M-101	Mezclador	200	13,1	50	0,17	18
Preparación medio de cultivo	M-102	Mezclador	500	13,1	50	0,17	18
Suspensión	M-102	Mezclador	500	30	50	0,17	18
Pretratamiento biomasa	M-102	Mezclador	500	30	50	3	18
Mezclado biomasa con NaOH	M-102	Mezclador	500	30	350	1	18
Lavado PHB	M-103	Mezclador	10	13,1	50	0,08	0,34
Mezclado PHB con ácido acético	M-104	Mezclador	30	80	150	1	0,55
Secado lechada	DE-101	Secador de bandejas	3360	60	-	8	0,45
Secado PHB	DE-101	Secador de bandejas	3360	13,1	-	-	0,45
Evaporación ácido acético	DE-102 A/D	Placa de calentamiento	No aplica	80	-	0,9	1,9
Centrifugación hidrolizado	FF-101	Centrifugadora	785	13,1	10000xg	0,17	30
Centrifugación biomasa	FF-102	Centrifugadora	350	4	4000xg	0,17	30
Centrifugación PHB	FF-102	Centrifugadora	350	13,1	6000	0,75	30
Esterilización	L-101	Filtro de membrana	1200	13,1	-	-	-
Hidrólisis	R-101	Reactor	2000	13,1	242	120	1,5
Inóculo 1	R-102	Reactor	1	30	250	24	1,5
Inóculo 2	R-103	Reactor	5	30	250	24	0,09
Inóculo 3	R-104	Reactor	30	30	250	24	0,75
Inóculo 4	R-105	Reactor	200	30	250	24	0,75
Inóculo 5	R-106	Reactor	500	30	250	24	0,55
Fermentación	R-107	Reactor	2000	30	250	48	1,5

Nota. Se muestran los equipos necesarios y las condiciones a las que deben trabajar para desarrollar cada operación unitaria del proceso de producción.

3.9. Área de producción requerida

Para conocer el área requerida para la producción de PHB a partir de residuos de papel de oficina se toma en cuenta el área ocupada por cada uno de los equipos, relacionadas en la **Tabla 18**.

Tabla 18.

Área ocupada por equipo

Código equipo	Área ocupada (m ²)
SR-101	0,21
SR-102	0,68
M-101	0,28
M-102	0,5
M-103	0,05
M-104	0,2
DE-101	1,68
DE-102 A/D	0,43
FF-101	4,5
FF-102	4,18
L-101	0,5
R-101	1,13
R-102	0,13
R-103	0,2
R-104	0,57
R-105	1,13
R-106	0,50
R-101	1,13

Nota. Se muestra el área que ocupa cada equipo presente en el proceso de producción de PHB.

De acuerdo con los valores de la tabla 18, en total, los equipos ocupan un área de 19,29m², sin embargo, debe existir un espaciado mínimo entre ellos, necesario para que sean operados correctamente y sin riesgos para el personal, para esto, se usa el método de cálculos de superficies de P.F. Guerchet, que proporciona el espacio total requerido con base a la suma de tres superficies parciales, que son la superficie estática (Ss), que se refiere al área ocupada por equipo, mostradas en la tabla 18, la gravitacional (Sg, representa el área necesaria para que un operario desempeñe

su labor) y la evolutiva (Se, que se refiere al área requerida para circulación) [96]. Para su cálculo, se muestran las ecuaciones 6 a 9, los resultados se encuentran consignados en la **Tabla 19**.

Ecuación 6.

Cálculo de la superficie estática (Ss)

$$Ss = l_{eq} \times a_{eq}$$

Nota. Se muestra la ecuación para calcular Ss para cada equipo donde l_{eq} es el largo del equipo y a_{eq} es el ancho del equipo. Tomado de: [96]

Ecuación 7.

Cálculo de la superficie gravitacional (Sg)

$$Sg = Ss \times N$$

Nota. Se muestra la ecuación para calcular Sg para cada equipo donde N es el número de lados operables del equipo. Tomado de: [96] M. Muñoz Cabanilla, “Capítulo IV Diseño de la distribución en planta,” [Trabajo de grado] Universidad Nacional Mayor de San Marcos, 2012. [Online]. Available: https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/tesis/ingenie/munoz_cm/cap4.pdf.

Ecuación 8.

Cálculo de la superficie evolutiva (Se)

$$Se = K(Ss + Sg)$$

Nota. Se muestra la ecuación para calcular Se para cada equipo donde K es un coeficiente único calculado en la ecuación 7. Tomado de: [96] M. Muñoz Cabanilla, “Capítulo IV Diseño de la distribución en planta,” [Trabajo de grado] Universidad Nacional Mayor de San Marcos, 2012. [Online]. Available: https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/tesis/ingenie/munoz_cm/cap4.pdf.

Ecuación 9.

Cálculo coeficiente K

$$K = \frac{\textit{Altura media trabajadores}}{2 \times \textit{Cota media equipos}}$$

Nota. Se muestra la ecuación K que relaciona la altura media de los trabajadores y la cota media de los equipos La altura media se toma como la estatura promedio en Colombia, que es de 1,719m [97]. Tomado de: [96] M. Muñoz Cabanilla, “Capítulo IV Diseño de la distribución en planta,” [Trabajo de grado] Universidad Nacional Mayor de San Marcos, 2012. [Online]. Available: https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/tesis/ingenie/munoz_cm/cap4.pdf.

Tabla 19.*Ss, Sg y Se por equipo*

Código equipo	Ss (m²)	Sg (m²)	Se (m²)	K	Stotal (m²)
SR-101	0,21	0,21	0,27		0,69
SR-102	0,68	0,68	0,88		2,24
M-101	0,28	0,28	0,36		0,92
M-102	0,50	0,50	0,65		1,65
M-103	0,05	0,05	0,06		0,16
M-104	0,20	0,20	0,26		0,66
DE-101	1,68	1,68	2,17		5,53
DE-102 A/D	0,43	0,86	0,83		2,12
DE-102 B/D	0,43	0,86	0,83		2,12
DE-102 C/D	0,43	0,86	0,83		2,12
DE-102 D/D	0,43	0,86	0,83	0,65	2,12
FF-101	4,5	4,5	5,85		14,85
FF-102	4,18	4,18	5,40		13,76
L-101	0,5	0,5	0,65		1,65
R-101	1,13	1,13	1,46		3,72
R-102	0,13	0,13	0,17		0,43
R-103	0,2	0,2	0,26		0,66
R-104	0,57	0,57	0,74		1,88
R-105	1,13	1,13	1,46		3,72
R-106	0,50	0,50	0,65		1,65
R-101	1,13	1,13	1,46		3,72
Área total	66,37				

Nota. Se muestra el valor de Ss, Sg y Se y Stotal (superficie total) de cada equipo, así como el área total requerida.

De acuerdo con lo observado en la **Tabla 19.**, al aplicar el método de cálculos de superficie mencionado anteriormente, el área de producción requerida para el proceso es de 66,37m².

4. ANÁLISIS DE COSTOS

Con el fin de profundizar la propuesta de fabricación de biofilm a partir de papel de oficina de la empresa International House Bogotá, se desarrolló un estudio de costos implicados en el proceso. Dentro de esta evaluación se determinaron los precios correspondientes a la compra de equipos necesarios, consumo energético de los mismos, costos por adquisición de materias primas, la inversión inicial en el terreno y personal operativo para la planta de producción.

4.1. Equipos

Inicialmente se registró en la **Tabla 20.**, el precio en pesos colombianos de cada uno de los equipos descritos en un apartado con anterioridad, teniendo en cuenta su codificación correspondiente.

Tabla 20.

Costo por equipo

Equipo	Costo (COP) [77]-[88]
SR-101	1053241,70
M-101	11534502,60
DE-101	9612085,50
SR-102	10299575,36
R-101	6766908,20
L-101	615173,40
FF-101	49990400,00
M-102	11534502,60
R-102	1549000,00
R-103	1872049,78
R-104	4771823,70
R-105	13175872
R-106	6766908,00
R-107	6766908,20
FF-102	57672513
M-103	192138,70
M-104	7112943,20

Tabla 21 (Continuación)

DE-102 A/D	1922417,10
DE-102 B/D	1922417,10
DE-102 C/D	1922417,10
DE-102 D/D	1922417,10

Nota. Se muestra el costo por equipo en pesos colombianos de acuerdo a su código. Elaborada con información tomada de diversas fuentes.

4.2. Consumo energético

El consumo energético se calculó (Anexo 3) teniendo en cuenta la **Ecuación 10.**, y el valor de potencia presentado para cada uno de los equipos y la duración de cada operación realizada en ellos, además, fue posible determinar la cantidad total de kW×h necesarios para llevar a cabo cada lote de producción de biofilm (**Tabla 21.**) y su precio final al considerar el precio por kWh industrial en la ciudad de Bogotá, correspondiente a \$485,23 COP [98].

Ecuación 10.

Cálculo consumo energético por equipo

$$\text{Consumo energético (kW * h)} = \text{Potencia (kW)} * \text{Tiempo(h)}$$

Nota. Se muestra la ecuación del cálculo del consumo energético que dimensiona la potencia consumida por hora de operación del equipo, teniendo en cuenta la cantidad de horas totales de la operación por lote [99].

Tabla 22.*Consumo y costo energético por equipo*

Equipo	Potencia (kW)	Tiempo (h) [77]-	Consumo (kW×h)	Costo (COP)
	[77]-[88]	[88]		[98]
SR-101	0,43	0,17	0,07	34,77
M-101	18	0,50	9	4367,07
M-101	18	0,17	3	1455,69
DE-101	0,45	8	3,60	1746,83
SR-102	15	0,08	1,23	597,74
R-101	1,50	120	180	87341,40
FF-101	30	0,17	5	2426,15
M-102	18	0,17	3	1455,69
R-102	1,50	24	36	17468,28
R-103	0,75	24	18	8734,14
R-104	0,75	24	18	8734,14
R-105	0,75	24	18	8734,14
R-106	0,75	24	18	8734,14
R-107	1,50	48	72	34936,56
FF-102	30	0,17	5	2426,15
M-102	18	0,17	3	1455,69
M-102	18	3	54	26202,42
M-102	18	1	18	8734,14
FF-102	30	0,75	22,50	10917,68
M-103	18	0,08	1,50	727,85
DE-101	0,45	1,32	0,60	289,05
M-104	0,55	1,00	0,55	266,88
DE-102	1,90	0,90	1,71	829,74
DE-102	1,90	0,90	1,71	829,74
DE-102	1,90	0,80	1,52	737,55
DE-102	1,9	0,80	1,52	737,55

Nota. Se muestra el consumo energético por lote y su costo por equipo mostrado de acuerdo con su código.
Elaborada con información tomada de diversas fuentes.

Adicionalmente fue posible calcular mediante un balance de energía realizado (Anexo 4) y con el desarrollo de la **Ecuación 11.**, el calor en kW suministrado en los secadores y placas de calentamiento para los procesos de secado mencionados en el proyecto. Para este cálculo fue importante considerar que el calor obtenido por una placa de calentamiento debía ser multiplicado

por 4 al poseer 4 placas de calentamiento integradas dentro del proceso de producción. Los costos asociados a estos resultados al considerar el precio por kWh industrial en la ciudad de Bogotá, correspondiente a \$485,23 COP [98] se presentan a continuación en la **Tabla 22**.

Ecuación 11.

Cálculo calor secadores y placas de calentamiento

$$Q = \sum \dot{N}_i * C_{pi} * \Delta T$$

Nota. Se muestra la ecuación del calor de los equipos tales como secadores y placas de calentamiento [100] M. Nave and R. Olmo, “Calor específico,” 2021. [Online]. Available: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/thermo/spht.html>.

Tabla 23.

Calor relacionado al uso de secadores y placas de calentamiento.

Equipo	Q (kW)
DE-101	102,1807
DE-101	-18,3543
DE-102 A,B,C,D	243,1421

Nota. Se observa el valor del calor calculado, proveniente del uso de secadores y placas de calentamiento en el proceso de producción de biofilm por lote.

Para un consumo de 326,9685 kW, el cual se relacionaría con un costo por lote de 158654,92 COP, sumado al costo asociado al consumo energético se tendría un precio final por concepto de energía de 387729,20 COP.

4.3. Materia prima

En el desarrollo de la investigación correspondiente a los costos asociados a la adquisición de materias primas, se consideró necesario realizar una investigación adicional a la mencionada con anterioridad en la descripción de la revisión bibliográfica realizada por los autores del artículo artículo “Production of bioplastic (poly-3-hydroxybutyrate) using waste paper as a feedstock: Optimization of enzymatic hydrolysis and fermentation employing *Burkholderia Sacchari*”,

debido a que el análisis de costos presentado en esta obra se presenta en dólares y es crucial para el proyecto conocer las cifras en pesos colombianos (COP).

Se enlistaron entonces cada una de las sustancias involucradas en el proceso de producción para posteriormente consultar su precio en plataformas de distribución internacionales, ajustando el cálculo a la cantidad necesaria de materia prima, la cual fue determinada mediante el balance de masa (Anexo 1).

Además, de la **Tabla 23**. Presentada a continuación es posible observar que se necesitan 32,85 kg de papel de oficina por lote (obteniendo 1,05 kg de biofilm) proceso que tiene una duración de 131, 257 h (cálculo realizado teniendo en cuenta los tiempos de operación de la planta luego de su instalación y primer lote). Por lo tanto, se realizaría 5,49 lotes al mes, con una producción de 5,76 kg de biofilm mensual y una producción de 69,12 kg anuales.

Los valores finales de los precios de cada uno de los reactivos y sustancias por lote se presentan a continuación en la **Tabla 23**.

Tabla 24.

Costo materia prima según cantidad requerida por lote

Materia prima	Unidades	Cantidad	Costo (COP) [34], [93]–[110]
Papel	kg	32,85	0
Agua	L	803,28	3068,11
H2O2	L	0,2	1250,00
Celulosa	kg	0,00018	614,41
b-glucosidasa	kg	0,000011	235,90
hemicelulosa	kg	0,000023	2053,38
KH ₂ PO ₄	kg	1,09	4510,13
Na ₂ HPO ₄	kg	1,14	554271,65
MgSO ₄	kg	0,23	28005,67
(NH ₄) ₅ [Fe(C ₆ H ₄ O ₇) ₂]	kg	0,02	75,21
CaCl ₂	kg	0,01	316,19
NH ₂ SO ₄	kg	0,55	804,33
Yeast extract	kg	2,62	2690105,10
Meat extract	kg	1,31	1858019,30
Peptone	kg	2,62	426741,01
(NH ₄) ₂ SO ₄	kg	0,52	14273,43

Tabla 25 (Continuación).

Agar	kg	3,93	266295,56
Agua destilada	kg	238,48	596200,00
NaCl	kg	1,91	503,50
NaOH	kg	0,95	1185,75
Etanol	kg	0,79	11842,11
Ácido acético	kg	22,14	58296,93

Nota. Se muestra el costo de cada materia prima de acuerdo a la cantidad requerida para la producción de un lote.

Elaborada con información tomada de diversas fuentes.

4.4. Área productiva

Para complementar la información de la inversión inicial que debe realizarse con el fin de llevar a cabo la propuesta del proceso de producción, se consultó el costo total que tendría la compra de un terreno con el área necesaria para la instalación de equipos y para la correcta y segura operación del sistema.

Se tomó como referencia clave el área de producción requerida determinada con anterioridad (66,37m²), además, se determinó la región específica de la ciudad de Bogotá en la cual se encontraría ubicado el terreno (Puente Aranda), para tomar esta decisión fue preciso considerar que se trata de una zona en donde se encuentran ubicadas la mayoría de las industrias existentes en la ciudad, y que cuyo parámetro se encuentra en un 70% ocupado por industrias productivas [119].

Se procedió entonces a buscar el precio por m² en este sector para finalmente determinar el valor total de compra que tendría el suelo, estos valores se observan a continuación en la **Tabla 24.**

Tabla 26.

Valor área productiva requerida

Área terreno (m ²)	Valor m ² (COP) [119]	Valor total (COP)
66,37	3740458	248254197,5

Nota. Se observa el valor del área de producción requerida según el valor por m² en el sector seleccionado.

Elaborada con información tomada de: metrocuadrado.com, “Sector Puente Aranda,” 2021. [Online]. Available: <https://www.metrocuadrado.com/noticias/precios-m2/occidente-sector-puente-aranda-983/>.

4.5. Personal operativo

Con el fin de calcular el costo mensual relacionado a la contratación de personal operativo fue indispensable determinar el número de jornadas diarias que serían necesarias para llevar a cabo un proceso de producción de manera continua (24h) ya que, dentro del sistema de fabricación de biofilm propuesto, se cuenta con operaciones unitarias que pueden llegar a tomar hasta 120h en realizarse.

Teniendo en cuenta que la jornada laboral ordinaria cuenta con 8h de actividad, se dividieron las 24 horas del día en tres turnos diferentes como se puede observar en la **Tabla 25.**, en donde en cada turno se contaría con dos empleados en planta, uno que supervise las operaciones de pretratamiento y la final transformación de PHB a biofilm, y un segundo operario que se encargaría de monitorear durante su turno la operación de actividades mucho más prolongadas como lo son el proceso de hidrólisis, el tren de inóculo y la fermentación.

Tabla 27.

Distribución de horarios por turno

Turno	Horario
Mañana	6:00am-2:00pm
Tarde	2:00pm-10:00pm
Noche	10:00pm-6:00am

Nota. Se muestra el horario de cada uno de los turnos para el personal operativo.

Debido a que la mayoría del proceso se realiza de forma lineal, el primer operario no tendría problema en supervisar más de una operación al tiempo, y el segundo empleado tendría un margen de tiempo tan amplio de control, que sus funciones probablemente serían finalizadas por otro operario en el siguiente turno.

Una vez encontrado el número de jornadas diarias y por lo tanto el número de personal en planta necesario al día, se procedió a calcular el salario base correspondiente al día y posteriormente al mes. Para esto, se consideró que sería preciso separar el grupo de fuerza laboral en dos subgrupos diferentes, en donde uno lleve a cabo una jornada de lunes a viernes, y por lo tanto el otro grupo desarrolle sus actividades exclusivamente en los días sábado y domingo.

Considerando que el personal que operaría 8h diarias por 5 días a la semana estaría trabajando un total de 40h semanales se toma la decisión de establecer como salario base (diurno ordinario) para estas personas el salario mínimo legal vigente a la fecha en el territorio colombiano, correspondiente a \$908526 COP. En cuanto al personal encargado en planta los días Sábado y Domingo, se realiza el cálculo de su salario (Anexo 5) teniendo en cuenta la **Ecuación 12.**, y lo establecido por el código nacional del trabajo (**Tabla 26.**), de esta forma fue posible encontrar el valor correspondiente al costo mensual por salarios de los operarios dependiendo del subgrupo al cual pertenecen (sin considerar aportes a seguridad social) como se observa en la **Tabla 27.**

Ecuación 12.

Cálculo salario mensual personal turno S-D

$$\text{Salario mensual (COP)} = \text{Salario mínimo hora (COP)} * \text{Tiempo trabajado(h)}$$

Nota. Se muestra la ecuación del cálculo del salario mensual correspondiente al personal del turno de los días Sábado y Domingo [120] Legis, “Datos laborales, financieros y tributarios 2021,” 2021, [Online]. Available: <http://www.comunidadcontable.com/BancoConocimiento/Contador/indicadores-laborales-financieros-y-tributarios.asp?>.

Tabla 28.

Valor del salario mínimo por hora

Concepto	Salario mínimo hora (COP) [120]
Diurna ordinaria	3785,53
Nocturna ordinaria	5110,46
Dominical diurna ordinaria	6624,67
Dominical nocturna ordinaria	7949,60

Nota. Se muestra el valor del salario mínimo por hora según la jornada en la que se labore[120] <http://www.comunidadcontable.com/BancoConocimiento/Contador/indicadores-laborales-financieros-y-tributarios.asp?>.

Tabla 29.*Salario mensual por operario*

Subgrupo	Turno	Salario mensual x operario (COP)
1 (L-V)	Mañana	908526
	Tarde	908526
	Noche	908526
2 (S-D)	Mañana	333126,2
	Tarde	343725,64
	Noche	349782,52

Nota. Se muestra el salario mensual por operario según el subgrupo y turno al que pertenece.

Una vez determinados los salarios mensuales de los operarios es posible calcular los costos asociados al pago de vacaciones y primas. Para encontrar el valor correspondiente a estos dos conceptos de forma mensual, fue necesario realizar ajuste de proporción, teniendo en cuenta que por año se pagan 15 días de vacaciones y 30 días laborales como prima.

Se realizó el cálculo del pago de vacaciones y primas anuales considerando los diferentes salarios por subgrupo y turno para posteriormente dividir estos valores encontrados por los 12 meses del año. Obteniendo los siguientes resultados reportados en la **Tabla 28**.

Tabla 30.*Vacaciones y prima mensual por operario*

Grupo	Turno	Costo Vacaciones (COP)	Costo primas (COP)
1 (L-V)	Mañana	104910,6236	209821,2471
	Tarde	104910,6236	209821,2471
	Noche	104910,6236	209821,2471
2 (S-D)	Mañana	104101,9375	208203,875
	Tarde	107414,2625	214828,525
	Noche	109307,0375	218614,075

Nota. Se muestra el pago mensual por operario según el subgrupo y turno al que pertenece de vacaciones y prima.

Posteriormente se realiza el cálculo correspondiente a los aportes a seguridad social que la empresa tiene la responsabilidad legal de cubrir (Anexo 6), considerando lo reportado en la

Ecuación 13., y que según la actividad económica desarrollada en la empresa el nivel de afiliación a la ARL para los empleados sería de nivel 3, los valores encontrados se encuentran en la **Tabla 29**.

Ecuación 13.

Cálculo aporte total nómina

$$\text{Aporte total nómina (COP)} = \text{Porcentaje de aporte (\%)} * \sum \text{salarios mensuales operarios (COP)}$$

Nota. Se muestra la ecuación del cálculo del aporte total a nómina de lo correspondiente a seguridad social por parte del empleador.

Tabla 31.

Aporte a seguridad social

	Porcentaje de aporte [120]	Aporte total nómina (COP)
Pensión	12%	900530,96
Salud	8,5%	637876,10
ARL	2,436%	182807,78

Nota. Se muestra el aporte total por nómina a pensión, salud y ARL.

Por último, se suma el valor de los aportes a seguridad social a la suma de los salarios de cada uno de los 12 empleados contratados según el subgrupo y turno al que pertenecen, obteniendo finalmente el costo total invertido en nómina laboral en un mes como se muestra a continuación en la **Tabla 30**.

Tabla 32.

Costo total por personal operativo

Número operarios	Costo total (COP)
12	11132304,90

Nota. Se muestra el costo total relacionado al personal operativo, así como el número de operarios necesarios.

4.6. Costos totales

Finalmente es posible determinar la inversión inicial total que es necesaria para poner en marcha el proyecto, simplemente sumando los costos calculados para cada concepto realizando una sumatoria final entre ellas como se muestra a continuación en la **Tabla 31**.

Tabla 33.

Costo total de producción

Concepto	Costo (COP)
Equipos	208976214,3
Consumo energético	387729,20
Materia prima	6518667,67
Área operativa	248254197,50
Personal operativo	11132304,90
Total	475369113,60

Nota. Se observa el costo total de producción teniendo en cuenta diferentes conceptos y su costo asociado.

Estos costos de inversión podrían verse disminuidos al encontrar distribuidores locales tanto para la adquisición de materia prima como para la compra de la maquinaria necesaria para el proyecto, además los costos generales del proyecto podrían ser menores en un 25% si la empresa encargada del proceso de producción de biofilm a partir de residuos de papel de oficina se proclama beneficiaria del descuento en el impuesto de renta por inversiones en control del medio ambiente o en conservación y mejoramiento del medio ambiente otorgado a aquellas empresas orientadas a la prevención y/o reducción en la generación y/o mejoramiento de la calidad de residuos líquidos, emisiones atmosféricas o residuos sólidos [48].

5. CONCLUSIONES

Se establecieron los criterios a evaluar para la selección del método de producción de biofilm a partir de residuos de papel de oficina teniendo en cuenta las características finales deseadas en el producto y la justificación del proceso de producción enfocada en contribuir a tratar una problemática medioambiental de nivel mundial como lo es la generación y acumulación de residuos plásticos no biodegradables. Por lo tanto, los factores definidos para la evaluación fueron el factor ambiental, seguridad del proceso y factibilidad como criterios con mayor peso relativo, seguidos en el siguiente orden por las propiedades mecánicas obtenidas, marco legal, rendimiento y costos.

Gracias a la revisión bibliográfica de tres de los métodos de producción de biofilm a partir de residuos de papel de oficina y mediante el uso de la matriz de decisión que relaciona los criterios de evaluación con cada método se estableció que el de mejor ajuste con estos es la producción de PHB con la bacteria *Burkholderia sacchari* usando los residuos de papel de oficina como sustrato, debido a la alta calificación en los criterios de mayor peso relativo, puesto que es un bioproceso que aprovecha un residuo para la fabricación de un producto de mayor valor (biofilm) y además se realiza con reactivos y equipos convencionales los cuales no incurren en riesgos ambientales o de seguridad significativos asociados a la producción.

Se estableció, a través de la revisión bibliográfica y su aplicación al caso, el proceso de producción de biofilm de PHB con la bacteria *Burkholderia sacchari* usando los residuos de papel de oficina como sustrato, junto con las operaciones, equipos y tiempos requeridos. Este se lleva a cabo en cuatro etapas que son la preparación del sustrato, upstream y fermentación, extracción de PHB y transformación de PHB. Además, mediante el balance de masa se determinó que se requieren 32,85kg/lote de papel y se producen 1,05kg/lote de biofilm llegando hasta 5,76kg/mes.

A partir de la revisión de fuentes bibliográficas se pudo establecer de forma teórica que la biopelícula puede presentar características equiparables a los otros polímeros con los que es comparado a menudo de acuerdo a la bibliografía, especialmente con el PP. Propiedades reportadas como el módulo de Young (1,2GPa), el esfuerzo de tracción (32MPa) y la temperatura de transición vítrea (0-7°C) demuestran que es un material con resistencia a las tensiones que pueden ser aplicadas durante su uso y también que se comporta como un material plástico y flexible, aun

así, al recibir cargas tiene cambios mínimos dado su bajo alargamiento a ruptura (9%) lo que puede también indicar que es un material con cierta rigidez.

Se determinaron los costos relacionados a la materia prima, consumo energético, equipos, área de producción y nómina laboral para obtener el costo total de producción, el cual es de 475369113,60 COP.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] P. Anbukarasu, D. Sauvageau, and A. Elias, “Turning the properties of polyhydroxybutyrate films using acetic acid via solvent casting,” *Sci. Rep.*, vol. 5, p. 15, 2015, doi: 10.1038/srep17884. [Online]. Available: <https://cutt.ly/OI0OdBk>
- [2] L. Fuhr, H. B. Fundación, M. Franklin, and F. F. P. Break, *El Atlas del plástico 2019 Datos y cifras sobre el mundo de los polímeros sintéticos*, Second edi. Creative Commons, 2019. [Online]. Available: <https://co.boell.org/sites/default/files/2021-02/Plastic Atlas 2019 cambio.pdf>.
- [3] Greenpeace, “Colombia, mejor sin plásticos,” *Campaña Plásticos*, p. 10, 2018, [Online]. Available: http://greenpeace.co/pdf/reporte_plasticos.pdf.
- [4] El Espectador, “¿Cuántos kilos de plástico se consumen en Colombia?,” 2018. [Online]. Available: <https://www.elespectador.com/noticias/actualidad/cuantos-kilos-de-plastico-se-consumen-en-colombia/>.
- [5] A. Araceli Acosta, “En 2050 habrá más plástico que peces en el océano,” 2019. [Online]. Available: https://www.abc.es/sociedad/abci-2050-habra-mas-plastico-peces-oceano-201601212107_noticia.html.
- [6] T. Saha, M. E. Hoque, and T. Mahub, “Biopolymers for Sustainable Packaging in Food, Cosmetics, and Pharmaceuticals,” *Adv. Process. Prop. Appl. Starch Other Bio-Based Polym.*, pp. 197–214, 2020, doi: 10.1016/b978-0-12-819661-8.00013-5. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/343357671_Biopolymers_for_Sustainable_Packaging_in_Food_Cosmetics_and_Pharmaceuticals.
- [7] Plastics Europe, “Plásticos – Situación en 2020,” p. 64, 2020, [Online]. Available: https://plasticseurope.org/es/wp-content/uploads/sites/4/2021/11/ES_Plastics_the_facts-WEB-2020_May21_final_updatedJuly2021.pdf.
- [8] Charlotte Wagner, “Bioplastics Types, applications, toxicity and regulation of bioplastics used in food contact materials,” 2014. [Online]. Available: <https://www.foodpackagingforum.org/food-packaging-health/bioplastics>.
- [9] Icontec Internacional, “NTC 5991,” 2014. [Online]. Available: <https://tienda.icontec.org/sectores/medio-ambiente-proteccion-de-la-salud-seguridad/proteccion-del-medio-ambiente/gp-envases-y-embalajes-requisitos-de-los->

envases-y-embalajes-valorizables-mediante-compostaje-y-biodegradacion-programa-de-ensayo-y-criterios.

- [10] C. E. Carolina, “Seminario Celulosa,” *DOC.MX*, p. 2, 2018, [Online]. Available: <https://xdoc.mx/documents/celulosa-5f9257a06e78a>.
- [11] J. J. Locane, “II. Fundamentos,” *Miradas locales en tiempos Glob.*, pp. 23–96, 2019, doi: 10.31819/9783954878840-003. [Online]. Available: <https://www.coursehero.com/file/63904461/leerpdf/>.
- [12] M. Gilbert, *Chapter 22 - Cellulose Plastics*, Eighth Edi. Elsevier Ltd, 2017. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-323-35824-8.00022-0>.
- [13] J. V. Martínez, “Capítulo I. Antecedentes y objetivos,” *El amanecer los pájaros*, pp. 17–26, 2020, doi: 10.2307/j.ctv1228j94.5. [Online]. Available: <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6428/06CAPITULO1.pdf?sequence=6>.
- [14] Orlando ROJAS y Johnny BULLON, “Fenómenos interfaciales en el destintado del papel desperdicio,” *LAB.FIRP*, vol. 3, 2007, [Online]. Available: <https://es.firp-ula.org/s847a-fenomenos-interfaciales-en-el-destintado-del-papel-desperdicio/>.
- [15] A. Alzate and H. Alzate, “Métodos utilizados en el destintado de papel desperdicio – aproximación al estado del arte,” *Rev. Investig. Apl.*, vol. 6, no. 1, pp. 9–25, 2012, [Online]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5001688>.
- [16] H. El-Shall, B. M. Moudgil, and A. El-Midany, “Separation of ink particles from waste paper by fine-bubbles,” *KONA Powder Part. J.*, vol. 23, no. March, pp. 122–128, 2005, doi: 10.14356/kona.2005015. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/242048722_Separation_of_Ink_Particles_from_Waste_Paper_by_Fine-bubbles#:~:text=The technique involves a simple,in rendering ink particles hydrophobic.
- [17] E. N. La and S. Y. Crecimiento, “Destintado de papel de impresión laser aplicando secuencias con ultrasonido de acción intensiva y procesamiento magnético-mecánico, orientado hacia la obtención de celulosa de alta pureza,” *UANL*, 2013, [Online]. Available: <http://eprints.uanl.mx/16991/>.
- [18] K. Stefanny and C. Gonzalez, “Obtención de acetato de celulosa a partir de papel reciclado : una alternativa para la producción de acetato de celulosa en Colombia Obtaining cellulose acetate from recycled paper : an alternative for the production of cellulose acetate in

- Colombia,” *ConBRepro*, pp. 1–9, 2020, [Online]. Available: https://aprepro.org.br/conbrepro/2020/anais/arquivos/09272020_190956_5f7113cc9b181.pdf.
- [19] R. Rasines Ladero, C. García Ruiz, M. López López, and M. Torre Roldán, “La nitrocelulosa en explosivos: propiedades y caracterización química,” *An. la Real Soc. Española Química*, vol. 105, no. 4, pp. 265–270, 2009, [Online]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3111619>.
- [20] D. M. Gaitán and L. I. Perez, “Aislamiento y evaluación de microorganismos celulolíticos a partir de residuos vegetales frescos y en compost generados en un cultivo de crisantemo (*Dendranthema grandiflora*),” [Trabajo de grado] Pontificia Universidad Javeriana, 2007. [Online]. Available: <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/8296/tesis274.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- [21] D. S. Loaiza Centeno, “Bacterias celulolíticas con características probióticas del intestino de termitas y su evaluación como potenciales degradadoras de totora (*Schoenoplectus tatora*),” [Trabajo de grado] Universidad Nacional del Altiplano, 2017. [Online]. Available: <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/6165>.
- [22] C. C. A. Guerrero, “Aislamiento De Bacterias Ruminales Degradadoras De Celulosa,” [Trabajo de grado] Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca, 2011. [Online]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/1506/14/UPS-CT002062.pdf>.
- [23] O. Ii and F. Alfaro-, “Matriz de Decisiones ¿Qué es?,” 2018. [Online]. Available: http://fcaenlinea1.unam.mx/anexos/1624/1624_u9_Matriz_de_decisiones.pdf.
- [24] A. Grajales, E. Serrano, and C. Hahn, “Los métodos del proceso multicriterio para la evaluación,” no. 36, pp. 285–306, 2013, [Online]. Available: <http://www.scielo.org.co/pdf/luaz/n36/n36a14.pdf>.
- [25] Instituto de Biomecánica de Valencia, “Nuevas técnicas para el desarrollo de productos innovadores orientados al usuario,” *Rev. Biomecánica*, pp. 1–4, 2001, [Online]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4762107>.
- [26] J. R. Pallar, “Métodos de decisión multicriterio electre y topsis aplicados a la elección de un dispositivo móvil,” *DOCPLAYER*, 2015, [Online]. Available: <https://docplayer.es/75104094-Metodos-de-decision-multicriterio-electre-y-topsis->

- aplicados-a-la-eleccion-de-un-dispositivo-movil.html.
- [27] M. K. Montoya and S. Rodríguez, C. Palacios, “Diseño de una torre de aireación y desgasificación para un cultivo semi-intensivo de tilapias en la empresa Lucarvel.” [Trabajo de grado] Fundación Universidad de América, 2021. [Online]. Available: <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/8668/1/6161771-2021-2-IQ.pdf>.
- [28] S. L. Galarza Molina, A. Torres, S. M. Fajardo, and B. C. Pérez muzuzu, “Herramienta de análisis multi-criterio como soporte para el diseño del programa social de la facultad de ingeniería,” *Sci. Direct*, vol. 27, no. 121, pp. 175–194, 2011, doi: 10.1016/s0123-5923(11)70187-5. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0123592311701875>.
- [29] C. Oliva *et al.*, “Concentrated sulfuric acid aqueous solution enables rapid recycling of cellulose from waste paper into antimicrobial packaging,” *Carbohydr. Polym.*, vol. 241, no. March, p. 116256, 2020, doi: 10.1016/j.carbpol.2020.116256.
- [30] H. Al-Battashi *et al.*, “Production of bioplastic (poly-3-hydroxybutyrate) using waste paper as a feedstock: Optimization of enzymatic hydrolysis and fermentation employing *Burkholderia sacchari*,” *J. Clean. Prod.*, vol. 214, pp. 236–247, 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.12.239. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652618339611>.
- [31] SOQUÍM, “Acido sulfurico, solucion 64%, P/V,” 2021. [Online]. Available: <https://www.soquim.com.mx/producto/acido-sulfurico-solucion-64-p-v/>.
- [32] Restauero Online, “Hidróxido de sodio 99,3% técnico (NaOH),” 2021. [Online]. Available: <https://www.restauero-online.com/El-hidroxido-de-sodio-993-tecnica-NaOH>.
- [33] P. Droguería, “Oxido de zinc polvo bolsa 250 g,” 2021. [Online]. Available: <https://www.farmaciaspasteur.com.co/salud-y-medicamentos-droga-blanca--750330/p>.
- [34] J. M. Naranjo Vasco, “Producción de Polihidroxibutirato a partir de residuos agroindustriales,” [Trabajo de grado] Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, 2010. [Online]. Available: https://www.academia.edu/11319363/PRODUCCIÓN_DE_POLIHIDROXIBUTIRATO_A_PARTIR_DE_RESIDUOS_AGROINDUSTRIALES.
- [35] S. N. S. Anis, N. Md Iqbal, S. Kumar, and A. A. Amirul, “Effect of different recovery

- strategies of P(3HB-co-3HHx) copolymer from *Cupriavidus necator* recombinant harboring the PHA synthase of *Chromobacterium* sp. USM2,” *Sep. Purif. Technol.*, vol. 102, pp. 111–117, 2013, doi: 10.1016/j.seppur.2012.09.036. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1383586612005217>.
- [36] C. A. Sanabria Rodríguez and D. E. Sarmiento Lemus, “Evaluación de la obtención de polihidroxialcanoatos (PHAs) partiendo del residuo de almidón de papa por medio de *Bacillus subtilis* a nivel laboratorio,” [Trabajo de grado] Universidad de América, 2017. [Online]. Available: <http://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/6040/2/6112713-2017-1-IQ.pdf>.
- [37] M. P. Arrieta, “Films de PLA y PLA-PHB plastificados para su aplicación en envases de alimentos. Caracterización y análisis de los procesos de degradación,” [Trabajo de grado] Universidad Politécnica de Valencia, 2014. [Online]. Available: <https://riunet.upv.es/handle/10251/39338>.
- [38] C. D. Lizcano Africano and D. L. Torres Pérez, “Recuperación de celulosa a partir de papel periódico post-consumo para la obtención de derivados de celulosa,” [Trabajo de grado] Universidad Industrial de Santander, 2010. [Online]. Available: <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2010/133247.pdf>.
- [39] Universidad de Zaragoza, “Preparación de membranas de triacetato de celulosa,” [Trabajo de grado] Universidad de Zaragoza, 2010. [Online]. Available: <https://zaguan.unizar.es/record/5133/files/TAZ-PFC-2010-204.pdf>.
- [40] O. A. Fridman and A. V. Sorokina, “Criteria of efficiency of cellulose acetate plasticization,” *Polym. Sci. - Ser. B*, vol. 48, no. 5, pp. 233–236, 2006, doi: 10.1134/S1560090406090028. [Online]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1134/S1560090406090028>.
- [41] MARBE, “ACIDO ACETICO GLACIAL Solución 6% P/V x 1000 ml | BIOPACK,” 2021. [Online]. Available: <https://www.marbequimica.com.ar/catalogo/productos-quimicos/acidos/acido-acetico-glacial-solucion-6-p-v-1-000-ml/>.
- [42] Restauero Online, “Ácido sulfúrico puro (H₂SO₄) 98% - 1 Litro,” 2021. [Online]. Available: <https://www.restauero-online.com/Acido-sulfurico-puro-H2SO4-98-1-Litro>.
- [43] F. Scientific, “Anhídrido acético, 99+ %, ACROS Organics™,” 2021. [Online]. Available: <https://www.fishersci.es/shop/products/acetic-anhydride-99-acros-organics-4/p-47974>.

- [44] QUIMINET, “n,n-dimetilacetamida,” 2021. [Online]. Available: <https://www.quiminet.com/productos/n-n-dimetilacetamida-27817773127/precios.htm>.
- [45] MERCK, “Dibutyl phthalate,” 2021. [Online]. Available: https://www.sigmaaldrich.com/CO/es/product/aldrich/524980?gclid=Cj0KCQjwvaeJBhCvARIsABgTDM6uhpitGPsT0SUkpP4Bg4_azfqfUHO2l88ZupKlh98OkxLpteS6uMwaAkXEALw_wcB.
- [46] MERCK, “Diethyl phthalate,” 2021. [Online]. Available: <https://bit.ly/32vzCII>.
- [47] F. Scientific, “Dimetil ftalato, 99 %, ACROS Organics™,” 2021. [Online]. Available: <https://www.fishersci.es/shop/products/dimethyl-phthalate-99-acros-organics-1/10306700/en>.
- [48] Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, “Guía de certificación de las inversiones realizadas en control, conservación y mejoramiento del medio ambiente para obtener descuento en el impuesto sobre la renta,” 2020. [Online]. Available: <https://www.car.gov.co/uploads/files/5f289ae65b578.pdf>.
- [49] ROTH, “Hoja de datos de seguridad ácido sulfúrico.” 2021, [Online]. Available: <https://bit.ly/3ArHnvR>.
- [50] Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo, “ICSC 0036 - ftalato de dibutilo,” 2018. [Online]. Available: https://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p_lang=es&p_card_id=0036&p_version=2.
- [51] Unión Europea, “Prohibición de los ftalatos en los juguetes y artículos de puericultura,” 10 de noviembre 1999. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/es/IP_99_829.
- [52] A. J. dos Santos, L. V. Oliveira Dalla Valentina, A. A. Hidalgo Schulz, and M. A. Tomaz Duarte, “From Obtaining to Degradation of PHB:Material Properties. Part I,” *Ing. y Cienc.*, 2017, doi: 10.17230/ingciencia.13.26.10. [Online]. Available: <http://www.scielo.org.co/pdf/ince/v13n26/1794-9165-ince-13-26-00269.pdf>.
- [53] E. R. Oliveira-Filho, J. G. C. Gomez, M. K. Taciro, and L. F. Silva, “Burkholderia sacchari (synonym Paraburkholderia sacchari): An industrial and versatile bacterial chassis for sustainable biosynthesis of polyhydroxyalkanoates and other bioproducts,” *Bioresour. Technol.*, vol. 337, no. April, 2021, doi: 10.1016/j.biortech.2021.125472. [Online].

- Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852421008129>.
- [54] G. M. B.-G. A. Ortega-Arias-Carbajal, “Separación, purificación y caracterización de poli-hidroxibutirato,” *ICIDCA Sobre los Deriv. la Caña Azúcar*, vol. 48, no. 1, pp. 7–15, 2014, [Online]. Available: <https://www.redalyc.org/pdf/2231/223131337002.pdf>.
- [55] N. B. Vacaseydel Aceves, “Aislamiento y diversidad de especies del género Burkholderia en el estado de Tamaulipas,” [Trabajo de grado] Instituto Politécnico Nacional, 2010. [Online]. Available: <https://tesis.ipn.mx/handle/123456789/8618>.
- [56] Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, “Presión Atmosférica | Datos Abiertos Colombia,” 2021. [Online]. Available: <https://www.datos.gov.co/en/Ambiente-y-Desarrollo-Sostenible/Presi-n-Atmosf-rica/62tk-nxj5>.
- [57] Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM, “Características Climatológicas De Ciudades Principales Y Municipios Turísticos,” *Inst. Hidrol. Meteorol. y Estud. Ambient.*, p. 48, 2018, [Online]. Available: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/418894/Características+de+Ciudades+Principales+y+Municipios+Turísticos.pdf/c3ca90c8-1072-434a-a235-91baee8c73fc>.
- [58] USP technologies, “What is the pH of H₂O₂ solutions - USP Technologies,” 2021. [Online]. Available: <https://www.usptechnologies.com/what-is-the-ph-of-h2o2-solutions/>.
- [59] Aquae fundación, “¿Qué es el Cp de Agua?,” 2021. [Online]. Available: <https://www.fundacionaquae.org/cp-del-agua/#:~:text=¿Cuál es el valor CP,°C en el sistema internacional.>
- [60] C. A. Orozco, “Calculo del flujo másico y caudal de aire para un ventilador utilizado en silos para secado para del café,” no. 35, pp. 207–212, 2007, [Online]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4804139.pdf>.
- [61] J. G. da C. Pradella, M. K. Taciro, and A. Y. P. Mateus, “High-cell-density poly (3-hydroxybutyrate) production from sucrose using Burkholderia sacchari culture in airlift bioreactor,” *Bioresour. Technol.*, vol. 101, 2010, doi: 10.1016/j.biortech.2010.05.046. [Online]. Available: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20580221/>.
- [62] P. M. Doran, *Bioprocess Engineering Principles*, 2nd ed., vol. 21. Elsevier, 1995. [Online]. Available: https://www.academia.edu/10346652/Bioprocess_Engineering_Principles_Pauline_M_Doran.

- [63] Corporación Emacin, “Polipropileno - PP,” 2021. [Online]. Available: https://www.emacin.com.pe/old_web/productos-plasticos-tecnicos-polipropileno-pp.php.
- [64] C. Caicedo-Cano, L. M. Crespo-Delgado, H. de la Cruz-Rodriguez, and N. Á. Álvarez-Jaramillo, “Propiedades termo-mecánicas del Polipropileno: Efectos durante el reprocesamiento,” *Ing. Investig. y Tecnol.*, vol. 18, no. 3, 2017, doi: 10.22201/fi.25940732e.2017.18n3.022. [Online]. Available: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-77432017000300245.
- [65] Goodfellow, “Polihidroxitirato - Biopolímero - Catalogo en linea - Materiales en pequenas cantidades para el diseno - Goodfellow.” 2021. [Online]. Available: <https://www.goodfellow.com/de/sp/catalogue-welcome>.
- [66] Ana Carolina Lemos Delgado and Alexis Mina Cordoba, “Polihidroxicanoatos (PHA) producidos por bacterias y su posible aplicación a nivel industrial,” *Inf. Técnico*, vol. 79, no. 1, pp. 93–101, 2015, [Online]. Available: [http://revistas.sena.edu.co/index.php/inf_tec/article/view/139#:~:text=Los Polihidroxicanoatos \(PHA\) son plásticos,los plásticos de origen petroquímico](http://revistas.sena.edu.co/index.php/inf_tec/article/view/139#:~:text=Los Polihidroxicanoatos (PHA) son plásticos,los plásticos de origen petroquímico).
- [67] Repsol, “Polietileno de alta y baja densidad - Usos y aplicaciones,” 2021. [Online]. Available: <https://bit.ly/3AswtWw>.
- [68] Petroquímica PEMEX, “Hoja de Datos Técnicos Polietileno de Baja Densidad Grado 20020X,” 2004. [Online]. Available: <http://www.plastiformas.com.mx/specs/px20020x.pdf>.
- [69] S. Allende and P. Arriagada, “Polietileno de alta y baja densidad,” 2013. [Online]. Available: <https://silo.tips/download/polietileno-de-alta-y-baja-densidad>.
- [70] L. Serna, A. Rodríguez, and F. Albán, “Ácido Poliláctico (PLA): Propiedades y Aplicaciones,” vol. 5, no. 1, pp. 16–26, 2003, [Online]. Available: https://revistaingenieria.univalle.edu.co/index.php/ingenieria_y_competitividad/article/view/2301.
- [71] Twenergy, “Todo lo que debes saber acerca del plástico PLA,” 2020. [Online]. Available: <https://twenergy.com/ecologia-y-reciclaje/que-es-plastico-pla/>.
- [72] Universitat Jaume, “Propiedades del PLA,” 2021. [Online]. Available: <https://sites.google.com/view/poliacidolactico-coma/poliácido-láctico>.
- [73] P. Pagès, F. Carrasco, J. Gámez-Pérez, O. O. Santana, and M. L. MasPOCH, “Processing of

- poly (lactic acid) (PLA) and PLA/montmorillonite nanocomposites in a pilot plant: A study of structural changes and thermal stability,” *Afinidad*, vol. 67, no. 546, pp. 107–113, 2010, [Online]. Available: <https://bit.ly/3Ix2eAK>.
- [74] B. P. Bustamante, “La degradación de los plásticos,” *Rev. Univ. EAFIT*, vol. 30, no. 94, pp. 67–86, 1994, [Online]. Available: <https://publicaciones.eafit.edu.co/index.php/revista-universidad-eafit/article/view/1408>.
- [75] DH gate, “Compre Con El Paquete De La Caja Al Por Menor Empaque Para Los Cables Del Cargador De Datos Línea 1m Cable USB Calidad OEM Original Samsung S7 S8 S9 S9 Nota 9 8 7 Huawei P A 0,91 € Del Alice_wedding_dress | Es.Dhgate.Com,” 2021. [Online]. Available: <https://www.amazon.com/-/es/auténtico-Samsung-cargador-adaptativo-rápido/dp/B017T28DIM>.
- [76] OMS España, “Bolsas de Polipropileno ¿qué son y para qué se usan?,” 2018. [Online]. Available: <https://omsespana.com/blog/bolsas-de-polipropileno-que-son-y-para-que-se-usan/>.
- [77] DH gate, “Compra Barato | Entrega Rápida Y Calidad | Es.Dhgate,” 2021. [Online]. Available: <https://bit.ly/3fQIonB>.
- [78] Todo en Artes, “Borrador Faber Castell Miga de Pan negro x 2,” 2021. [Online]. Available: <https://todoenartes.co/borradores/5051-borrador-faber-castell-miga-de-pan-negro-x-2.html>.
- [79] Home Sentry, “Repuesto Empaque Universal 23423-Blanco - Home Sentry Colombia,” 2021. [Online]. Available: https://www.homesentry.co/p/repuesto-empaque-universal-23423_blanco/.
- [80] Essentia, “El Catalizador,” vol. 2, 2019, [Online]. Available: <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-5449510>.
- [81] G. Nardi, “Packaging: TODA La Info Que Estás Buscando,” 2018. [Online]. Available: <https://desnudandoelmarketing.com/que-es-el-packaging/>.
- [82] World Bakers, “United Biscuits Tests New Biscuit Packaging System Bosch Two-in-One – WorldBakers,” 2015. [Online]. Available: <https://www.worldbakers.com/process/united-biscuit-tested-the-new-biscuit-packaging-system-bosch-two-in-one/>.
- [83] Alibaba.com, “Dt-200c /dt-200c+ 22sheets Cross Cut 3.9x38mm Continous Paper Shredder Machine For Office Or Personal - Buy 22sheets Cross Cut 3.9x38mm Continous Paper

- Shredder Machine For Office Or Personal,22sheets Cross Cut 3.9x38mm Paper Shredder Machine,Paper Shredd,” 2021. [Online]. Available: https://www.alibaba.com/product-detail/DT-200C-DT-200C-22sheets-cross_62129851482.html.
- [84] Alibaba.com, “Small Food Beverage Liquid Pharmaceutical Pilot Plant Mixer Ss Cone Bottom Fluid Sterile Stainless Steel Mixing Vessel - Buy Pharmaceutical Mixing Vessels,Sterile Mixing Vessel,Liquid Food Beverage Mixing Vessel,” 2021. [Online]. Available: <https://www.alibaba.com/showroom/sterile-mixing-vessel.html>.
- [85] Alibaba.com, “Industrial Hot Air Tray Dryer - Buy Tray Dryer,Industrial Tray Dryer,Hot Air Dryer,” 2021. [Online]. Available: https://www.alibaba.com/product-detail/Industrial-hot-air-tray-dryer_60429893034.html.
- [86] Alibaba.com, “Maquina Molino Trituradora De Pet Tubo De Plastico - Buy Triturador De Tubo De Plastico,Trituradora De Plastico,Molino Triturador De Plasticos,” 2021. [Online]. Available: <https://bit.ly/3tThDXM>.
- [87] Alibaba.com, “1-5l Single Layer Glass Reactor - Buy Single Layer Glass Reactor,Glass Reactor,” 2021. [Online]. Available: https://www.alibaba.com/product-detail/5L-Single-layer-glass-reactor_62395527052.html.
- [88] Alibaba.com, “Reactor De Vidrio De Laboratorio,5l,10l,20l,50l,100l,200l,Cbd,Químico,Capa Única,Calefacción De Agitación,Reactor De Vidrio - Buy Single Layer Electric Agitated Heating Glass Reactor With Best Price,Cbd Extraction Chemical Single Layer Glass Reactor With .” 2021. [Online]. Available: <https://m.japanese.alibaba.com/p-detail/Laboratory-Glass-Reactor-5L-10L-20L-1600209579029.html>.
- [89] Alibaba.com, “Pgz Automatic Food Industrial Centrifuge With Model Pgz-800 - Buy Food Industrial Centrifuge,Automatic Food Centrifuge,Food Centrifuge,” 2021. [Online]. Available: https://www.alibaba.com/product-detail/PGZ-800-Automatic-Bottom-Discharge-Centrifuge_60804451589.html.
- [90] Alibaba.com, “Pharmacy Industry Centrifuge Olive Oil Centrifuge Decanter Centrifuge - Buy Food Centrifuge Machine,Food Processing Centrifuge,Seaweed Centrifuge Product on Alibaba.com,” 2021. [Online]. Available: <https://bit.ly/3rNse3P>.
- [91] Alibaba.com, “Liquid/oil/wine/beer/honey/syrup/paint Filtration Machine Stainless Steel 304 Multi Bag Filter Housing - Buy Filter Housing,Bag Filter Housing,Stainless Steel Filter

- Housing,” 2021. [Online]. Available: https://www.alibaba.com/product-detail/Liquid-oil-wine-beer-honey-syrup_1600171069983.html.
- [92] ACEQ Laboratorios, “Placa De Calentamiento PLD-6018 60x60 | Aceq Laboratorios,” 2021. [Online]. Available: <https://aceqlaboratorios.com.co/producto/equipos-para-laboratorio/planchas/placa-de-calentamiento-pld-6018/>.
- [93] Alibaba.com, “Kosun Chemical Vessel Batch Reactor 1000l Price Pharmaceutical Industrial Bioreactor - Buy Chemical Reactor Vessel, Batch Reactor 1000l Price, Pharmaceutical Industrial Bioreactor,” 2021. [Online]. Available: <https://bit.ly/3fRSbK3>.
- [94] Alibaba.com, “20l 30l 50l 200l 500l 1000l Stainless Steel Liquid Mixing Tank - Buy Mixing Tank 3000 L Agitator, Mixing Tank 20l, 200 Liter Mixing Tank,” 2021. [Online]. Available: https://www.alibaba.com/product-detail/20L-30L-50L-200L-500L-1000L_1600235862236.html.
- [95] Alibaba.com, “20l 30l 50l 100l Electric Heating And Mixing Jacketed Stainless Steel Reactor Sus304 /316l Tank Mixer - Buy Electric Heating And Mixing Tank Mixer, Tank Mixer, Mixing Tank Mixer,” 2021. [Online]. Available: https://www.made-in-china.com/products-search/hot-china-products/Stainless_Steel_Reaction_Vessel.html.
- [96] M. Muñoz Cabanilla, “Capítulo IV Diseño de la distribución en planta,” [Trabajo de grado] Universidad Nacional Mayor de San Marcos, 2012. [Online]. Available: https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/tesis/ingenie/munoz_cm/cap4.pdf.
- [97] El Tiempo, “Estatura en Colombia: los países con las personas más altas del mundo - Tendencias - Vida,” 2021. [Online]. Available: <https://bit.ly/3fTlqMH>.
- [98] ENEL, “Tarifas de energía eléctrica reguladas por la CREG,” 2021. [Online]. Available: <https://www.enel.com.co/content/dam/enel-co/español/personas/1-17-1/2021/Tarifario-enero-2021.pdf>.
- [99] CENTROSUR, “Calcular Consumo,” 2021, [Online]. Available: <https://www.centrosur.gob.ec/calcular-consumo/>.
- [100] M. Nave and R. Olmo, “Calor específico,” 2021. [Online]. Available: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/thermo/spht.html>.
- [101] Acueducto, “Tarifas Bogotá 2021,” 2021. [Online]. Available: <https://bit.ly/3rLspwF>.
- [102] Mercado Libre, “Peroxido De Hidrogeno 50% V/v Garrafa X 20 Litros,” 2021. [Online].

- Available: <https://bit.ly/3Iw4isC>.
- [103] Hebei Simel Import & Export, “dihidrógeno fosfato potásico KH_2PO_4 ,” 2021. [Online]. Available: https://spanish.alibaba.com/product-detail/potassium-dihydrogen-phosphate-kh2po4-1600304970135.html?spm=a2700.7724857.normal_offer.d_title.56e1131dNtq9S6.
- [104] PanReactAppliChem, “di-Sodio Hidrógeno Fosfato anhidro (Reag. Ph. Eur.) para análisis, ACS,” 2021. [Online]. Available: <https://www.itwreagents.com/iberia/es/product/di-sodio-hidrogeno-fosfato-anhidro-reag-ph-eur-para-analisis-ac/131679>.
- [105] Restaurio Oline, “Sulfato de magnesio anhidro para análisis (MgSO_4) - 1 kg,” 2021. [Online]. Available: <https://www.restauro-online.com/Sulfato-de-magnesio-anhidro-para-el-analisis-MgSO4-1-kg>.
- [106] L. V. S. Jiangsu Kolod Food Ingredients Co., “Ammonium ferric citrate,” 2021. [Online]. Available: https://www.chemicalbook.com/ProductList_En.aspx?kwd=Ammonium+ferric+citrate&gclid=CjwKCAjwoP6LBhBIEiwAvCcthDQ6nKE8O7VPmu35GAaPW9kuqr-3lCkT1QdxtuCAgwrw2Y8R-fAvZxoCK1kQAvD_BwE.
- [107] Restaurio Oline, “Cloruro de calcio técnica (CaCl_2) - 1 kg,” 2021. [Online]. Available: <https://www.restauro-online.com/Cloruro-de-calcio-tecnica-CaCl2-1-kg>.
- [108] Chengdu Chelation Biology Technology, “polvo de aminoácido NH_2SO_4 ,” 2021. [Online]. Available: https://es.made-in-china.com/co_cdaohebio/product_Amino-Acid-Powder-Nh2so4-Type-Plant-Source_ehuuugngg.html.
- [109] MERCK, “Yeast Extract,” 2021. [Online]. Available: https://www.sigmaaldrich.com/CO/es/product/sigma/y1625?gclid=CjwKCAjwoP6LBhBIEiwAvCcthOTEFcr5vCk156HxtbZVHpES4yaaWPvf9OZZf-ld7VL-9B1thBjE9RoC0UIQAvD_BwE.
- [110] MERCK, “Meat extract,” 2021. [Online]. Available: https://www.sigmaaldrich.com/CO/es/product/sial/70164?gclid=CjwKCAjwoP6LBhBIEiwAvCcthBBhy0kj07I9yMpsM2ZyoakAPICZ6335rI_dyrFZH5W38N8RgN5tvhoC5yEQAvD_BwE.
- [111] Sisco, Research, Laboratories, and P. Ltd., “Peptone BactoBio for bacteriology,” 2021. [Online]. Available: http://www.srlchem.com/products/product_details/productId/3602/Peptone-BactoBio-for-

- bacteriology.
- [112] A. Chemicals, “Sulfato de amonio - Fertilizante - (NH₄)₂SO₄ - 21-0-0 - 5 libras,” 2021. [Online]. Available: <https://www.amazon.com/-/es/Sulfato-amonio-Fertilizante-21-0-0-libras/dp/B007ODQF5U>.
- [113] L. Dalian Future International Co., “Agar gel de fuerza 1050 agar precio,” 2021. [Online]. Available: https://spanish.alibaba.com/product-detail/agar-agar-gel-strength-1050-agar-price-62071174186.html?spm=a2700.7724857.normal_offer.d_title.141b7c4ckRAUfa.
- [114] Mercado Libre, “Agua Destilada O Desionizada 20 Litros - L a \$2500,” 2021. [Online]. Available: <https://bit.ly/3qWNtkM>.
- [115] L. Anhui Daodong Import & Export Co., “Cloruro de sodio Industrial garde, 99% min, NaCl, precios de sal por tonelada,” 2021. [Online]. Available: https://spanish.alibaba.com/product-detail/industrial-garde-99-min-sodium-chloride-nacl-prices-of-salt-per-ton-62467999425.html?spm=a2700.7724857.normal_offer.d_title.3ac155cdKMHGzX.
- [116] L. Jungar Banner Xinrong Chemicals Co., “A granel soda cáustica NaOH fábrica,” 2021. [Online]. Available: https://spanish.alibaba.com/product-detail/bulk-caustic-soda-naoh-factory-manufacturer-price-in-china-60792665275.html?spm=a2700.7724857.normal_offer.d_title.14f674a5VQyE2V.
- [117] Mercado Libre, “Alcohol Etilico Al 96 × 3.8 Lt Galon - - L A \$60000,” 2021. [Online]. Available: <https://bit.ly/3fUwgSI>.
- [118] L. Shijiazhuang Chemical Tech Co., “Ácido acético GAA, grado alimenticio, Grado Industrial, GAA, 99.5%,” 2021. [Online]. Available: https://spanish.alibaba.com/product-detail/food-grade-industry-grade-glacial-acetic-acid-gaa-99-5--1600248064888.html?spm=a2700.7735675.normal_offer.d_title.53574b65sHfVjr&s=p.
- [119] metrocuadrado.com, “Sector Puente Aranda,” 2021. [Online]. Available: <https://www.metrocuadrado.com/noticias/precios-m2/occidente-sector-puente-aranda-983/>.
- [120] Legis, “Datos laborales, financieros y tributarios 2021,” 2021, [Online]. Available: <http://www.comunidadcontable.com/BancoConocimiento/Contador/indicadores-laborales-financieros-y-tributarios.asp?>.
- [121] Ciencia de hoy, “Propiedades térmicas del papel,” 2021. [Online]. Available:

- <https://cienciadehoy.com/propiedades-termicas-del-papel-2/>.
- [122] Mente Ácida, “H₂O₂ El peróxido de hidrógeno,” 2021. [Online]. Available: <https://menteacida.com/h2o2-el-peroxido-de-hidrogeno.html>.
- [123] Serway. Physics for Scientists and Engineers and Sears Z & Y. Física Universitaria, “Capacidades Caloríficas,” 2021. [Online]. Available: <https://didactica.fisica.uson.mx/tablas/capcalorificas.htm>.
- [124] Chromalox, “Datos de referencia Propiedades físicas y termodinámicas de los líquidos comunes,” 2021. [Online]. Available: <https://www.chromalox.com/catalog/resources/technical-information/Reference-Data-Properties-of-Liquids-sp.pdf>.
- [125] S. Velez, “Polímeros,” 2014. [Online]. Available: <https://issuu.com/santy94/docs/polimeros>.

ANEXOS

ANEXO 1

BALANCE DE MASA POR CORRIENTE

Sustancia	Unidades	1	2	3	4	5	6
Papel	kg	32,85	32,85	0	0	0	32,85
Agua	kg	0	0	0	39,63	39,63	79,78
H2O2	kg	0	0	0,29	0	0,29	0,29
Celulasa	kg	0	0	0	0	0	0
b-glucosidasa	kg	0	0	0	0	0	0
hemicelulasa	kg	0	0	0	0	0	0
glucosa	kg	0	0	0	0	0	0
xilosa	kg	0	0	0	0	0	0
lignina	kg	0	0	0	0	0	0
cenizas	kg	0	0	0	0	0	0
KH ₂ PO ₄	kg	0	0	0	0	0	0
Na ₂ HPO ₄	kg	0	0	0	0	0	0
MgSO ₄	kg	0	0	0	0	0	0
(NH ₄) ₅ [Fe(C ₆ H ₄ O ₇) ₂]	kg	0	0	0	0	0	0
CaCl ₂	kg	0	0	0	0	0	0
NH ₂ SO ₄	kg	0	0	0	0	0	0
Yeast extract	kg	0	0	0	0	0	0
Meat extract	kg	0	0	0	0	0	0
Peptone	kg	0	0	0	0	0	0
(NH ₄) ₂ SO ₄	kg	0	0	0	0	0	0
Agar	kg	0	0	0	0	0	0
Biomasa	kg	0	0	0	0	0	0
Agua destilada	kg	0	0	0	0	0	0
NaCl	kg	0	0	0	0	0	0
NaOH	kg	0	0	0	0	0	0
PHB	kg	0	0	0	0	0	0
Etanol	kg	0	0	0	0	0	0
Ácido acético	kg	0	0	0	0	0	0

Biofilm	kg	0	0	0	0	0	0
Aire	kg	0	0	0	0	0	0
CO2	kg	0	0	0	0	0	0
Total corriente	Kg	32,85	32,85	0,29	39,63	39,92	112,92

Sustancia	Unidades	7	8	9	10	11	12
Papel	kg	0	0	32,85	32,85	0	0
Agua	kg	79,78	40,07	0	0	0	0
H2O2	kg	0,29	0	0	0	0	0
Celulasa	kg	0	0	0	0	2E-04	0
b-glucosidasa	kg	0	0	0	0	0	1E-05
hemicelulasa	kg	0	0	0	0	0	0
glucosa	kg	0	0	0	0	0	0
xilosa	kg	0	0	0	0	0	0
lignina	kg	0	0	0	0	0	0
cenizas	kg	0	0	0	0	0	0
KH2PO4	kg	0	0	0	0	0	0
Na2HP4	kg	0	0	0	0	0	0
MgSO4	kg	0	0	0	0	0	0
(NH4)5[Fe(C6H4O7)2]	kg	0	0	0	0	0	0
CaCl2	kg	0	0	0	0	0	0
NH2SO4	kg	0	0	0	0	0	0
Yeast extract	kg	0	0	0	0	0	0
Meat extract	kg	0	0	0	0	0	0
Peptone	kg	0	0	0	0	0	0
(NH4)2SO4	kg	0	0	0	0	0	0
Agar	kg	0	0	0	0	0	0
Biomasa	kg	0	0	0	0	0	0

Agua destilada	kg	0	0	0	0	0	0
NaCl	kg	0	0	0	0	0	0
NaOH	kg	0	0	0	0	0	0
PHB	kg	0	0	0	0	0	0
Etanol	kg	0	0	0	0	0	0
Ácido acético	kg	0	0	0	0	0	0
Biofilm	kg	0	0	0	0	0	0
Aire	kg	0	0	0	0	0	0
CO2	kg	0	0	0	0	0	0
						1,75E-	1,10E-
Total corriente	kg	80,07	40,07	32,85	32,85	04	05

Sustancia	Unidades	13	14	15	16	17	18
Papel	kg	0	0	0	0	0	0
Agua	kg	0	456,07	458,22	0	458,22	0
H2O2	kg	0	0	0	0	0	0
Celulasa	kg	0	0	0	0	0	0
b-glucosidasa	kg	0	0	0	0	0	0
hemicelulasa	kg	2E-05	0	0	0	0	0
glucosa	kg	0	0	24,07	0	24,07	0
xilosa	kg	0	0	1,85	0	1,85	0
lignina	kg	0	0	0,86	0,86	0	0
cenizas	kg	0	0	3,47	3,47	0	0
KH2PO4	kg	0	0	0	0	0	1,09
Na2HP4	kg	0	0	0	0	0	1,14
MgSO4	kg	0	0	0	0	0	0,23
(NH4)5[Fe(C6H4O7)2]	kg	0	0	0	0	0	0,02
CaCl2	kg	0	0	0	0	0	0,01
NH2SO4	kg	0	0	0	0	0	0,55
Yeast extract	kg	0	0	0	0	0	0
Meat extract	kg	0	0	0	0	0	0

Peptone	kg	0	0	0	0	0	0
(NH ₄) ₂ SO ₄	kg	0	0	0	0	0	0
Agar	kg	0	0	0	0	0	0
Biomasa	kg	0	0	0	0	0	0
Agua destilada	kg	0	0	0	0	0	0
NaCl	kg	0	0	0	0	0	0
NaOH	kg	0	0	0	0	0	0
PHB	kg	0	0	0	0	0	0
Etanol	kg	0	0	0	0	0	0
Ácido acético	kg	0	0	0	0	0	0
Biofilm	kg	0	0	0	0	0	0
Aire	kg	0	0	0	0	0	0
CO ₂	kg	0	0	0	0	0	0
Total corriente	kg	2E-05	456,07	488,47	4,33	484,14	3,04

Sustancia	Unidades	19	20	21	22	23	24
Papel	kg	0	0	0	0	0	0
Agua	kg	458,22	458,22	0	0,1996	0,1996	1,996
H ₂ O ₂	kg	0	0	0	0	0	0
Celulasa	kg	0	0	0	0	0	0
b-glucosidasa	kg	0	0	0	0	0	0
hemicelulasa	kg	0	0	0	0	0	0
glucosa	kg	24,07	24,07	0	0	0	0
xilosa	kg	1,85	1,85	0	0	0	0
lignina	kg	0	0	0	0	0	0
cenizas	kg	0	0	0	0	0	0
KH ₂ PO ₄	kg	1,09	1,09	0	0	0	0
Na ₂ HPO ₄	kg	1,14	1,14	0	0	0	0
MgSO ₄	kg	0,23	0,23	0	0	0	0
(NH ₄) ₅ [Fe(C ₆ H ₄ O ₇) ₂]	kg	0,02	0,02	0	0	0	0
CaCl ₂	kg	0,01	0,01	0	0	0	0

NH ₂ SO ₄	kg	0,55	0,55	0	0	0	0
Yeast extract	kg	0	0	0	2E-03	0	0,02
Meat extract	kg	0	0	0	1E-03	0	0,01
Peptone	kg	0	0	0	2E-03	0	0,02
(NH ₄) ₂ SO ₄	kg	0	0	0	4E-04	0	4E-03
Agar	kg	0	0	0	3E-03	0	0,03
Biomasa	kg	0	0	8E-05	0	8E-04	0
Agua destilada	kg	0	0	0	0	0	0
NaCl	kg	0	0	0	0	0	0
NaOH	kg	0	0	0	0	0	0
PHB	kg	0	0	0	0	0	0
Etanol	kg	0	0	0	0	0	0
Ácido acético	kg	0	0	0	0	0	0
Biofilm	kg	0	0	0	0	0	0
Aire	kg	0	0	0	0	0	0
CO ₂	kg	0	0	0	0	0	0
Total corriente	kg	487,18	487,18	8E-05	0,21	0,20	2,08

Sustancia	Unidades	25	26	27	28	29	30
Papel	kg	0	0	0	0	0	0
Agua	kg	1,996	9,98	9,98	49,90	49,90	199,60
H ₂ O ₂	kg	0	0	0	0	0	0
Celulasa	kg	0	0	0	0	0	0
b-glucosidasa	kg	0	0	0	0	0	0
hemicelulasa	kg	0	0	0	0	0	0
glucosa	kg	0	0	0	0	0	0
xilosa	kg	0	0	0	0	0	0
lignina	kg	0	0	0	0	0	0
cenizas	kg	0	0	0	0	0	0
KH ₂ PO ₄	kg	0	0	0	0	0	0

Na ₂ HPO ₄	kg	0	0	0	0	0	0
MgSO ₄	kg	0	0	0	0	0	0
(NH ₄) ₅ [Fe(C ₆ H ₄ O ₇) ₂]	kg	0	0	0	0	0	0
CaCl ₂	kg	0	0	0	0	0	0
NH ₂ SO ₄	kg	0	0	0	0	0	0
Yeast extract	kg	0	0,1	0	0,5	0	2
Meat extract	kg	0	0,05	0	0,25	0	1
Peptone	kg	0	0,1	0	0,5	0	2
(NH ₄) ₂ SO ₄	kg	0	0,02	0	0,1	0	0,4
Agar	kg	0	0,15	0	0,75	0	3
Biomasa	kg	4E-03	0	0,02	0	0,08	0
Agua destilada	kg	0	0	0	0	0	0
NaCl	kg	0	0	0	0	0	0
NaOH	kg	0	0	0	0	0	0
PHB	kg	0	0	0	0	0	0
Etanol	kg	0	0	0	0	0	0
Ácido acético	kg	0	0	0	0	0	0
Biofilm	kg	0	0	0	0	0	0
Aire	kg	0	0	0	0	0	0
CO ₂	kg	0	0	0	0	0	0
Total corriente	kg	2	10,4	10	52	49,98	208

Sustancia	Unidades	31	32	33	34	35	36
Papel	kg	0	0	0	0	0	0
Agua	kg	199,6	199,6	199,6	0	0	0
H ₂ O ₂	kg	0	0	0	0	0	0
Celulasa	kg	0	0	0	0	0	0
b-glucosidasa	kg	0	0	0	0	0	0
hemicelulasa	kg	0	0	0	0	0	0
glucosa	kg	0	0	0	0	0	0
xilosa	kg	0	0	0	0	0	0

lignina	kg	0	0	0	0	0	0
cenizas	kg	0	0	0	0	0	0
KH ₂ PO ₄	kg	0	1,09	1,09	0	0	0
Na ₂ HPO ₄	kg	0	1,14	1,14	0	0	0
MgSO ₄	kg	0	0,23	0,23	0	0	0
(NH ₄) ₅ [Fe(C ₆ H ₄ O ₇) ₂]	kg	0	0,02	0,02	0	0	0
CaCl ₂	kg	0	0,01	0,01	0	0	0
NH ₂ SO ₄	kg	0	0,55	0,55	0	0	0
Yeast extract	kg	0	0	0	0	0	0
Meat extract	kg	0	0	0	0	0	0
Peptone	kg	0	0	0	0	0	0
(NH ₄) ₂ SO ₄	kg	0	0	0	0	0	0
Agar	kg	0	0	0	0	0	0
Biomasa	kg	0,26	2,38	0	2,38	0	0
Agua destilada	kg	0	0	0	0	238,48	0
NaCl	kg	0	0	0	0	0	1,91
NaOH	kg	0	0	0	0	0	0
PHB	kg	0	0	0	0	0	0
Etanol	kg	0	0	0	0	0	0
Ácido acético	kg	0	0	0	0	0	0
Biofilm	kg	0	0	0	0	0	0
Aire	kg	0	0	0	0	0	0
CO ₂	kg	0	0	0	0	0	0
Total corriente	kg	199,86	205,02	202,64	2,38	238,48	1,91

Sustancia	Unidades	37	38	39	40	41	42
Papel	kg	0	0	0	0	0	0
Agua	kg	0	0	0	0	3,99	0
H ₂ O ₂	kg	0	0	0	0	0	0
Celulasa	kg	0	0	0	0	0	0
b-glucosidasa	kg	0	0	0	0	0	0

hemicelulasa	kg	0	0	0	0	0	0
glucosa	kg	0	0	0	0	0	0
xilosa	kg	0	0	0	0	0	0
lignina	kg	0	0	0	0	0	0
cenizas	kg	0	0	0	0	0	0
KH ₂ PO ₄	kg	0	0	0	0	0	0
Na ₂ HPO ₄	kg	0	0	0	0	0	0
MgSO ₄	kg	0	0	0	0	0	0
(NH ₄) ₅ [Fe(C ₆ H ₄ O ₇) ₂]	kg	0	0	0	0	0	0
CaCl ₂	kg	0	0	0	0	0	0
NH ₂ SO ₄	kg	0	0	0	0	0	0
Yeast extract	kg	0	0	0	0	0	0
Meat extract	kg	0	0	0	0	0	0
Peptone	kg	0	0	0	0	0	0
(NH ₄) ₂ SO ₄	kg	0	0	0	0	0	0
Agar	kg	0	0	0	0	0	0
Biomasa	kg	0	2,38	0	0	0	0
Agua destilada	kg	0	238,48	238,48	0	0	0
NaCl	kg	0	1,91	1,91	0	0	0
NaOH	kg	0,95	0,95	0,95	0	0	0
PHB	kg	0	0	0	1,05	0	0
Etanol	kg	0	0	0	0	0	0,79
Ácido acético	kg	0	0	0	0	0	0
Biofilm	kg	0	0	0	0	0	0
Aire	kg	0	0	0	0	0	0
CO ₂	kg	0	0	0	0	0	0
Total corriente	kg	0,95	243,72	241,34	1,05	3,992	0,79

Sustancia	Unidades	43	44	45	46	47	48	49
Papel	kg	0	0	0	0	0	0	0
Agua	kg	3,99	3,99	0	0	0	0	0

H2O2	kg	0	0	0	0	0	0	0
Celulasa	kg	0	0	0	0	0	0	0
b-glucosidasa	kg	0	0	0	0	0	0	0
hemicelulasa	kg	0	0	0	0	0	0	0
glucosa	kg	0	0	0	0	0	0	0
xilosa	kg	0	0	0	0	0	0	0
lignina	kg	0	0	0	0	0	0	0
cenizas	kg	0	0	0	0	0	0	0
KH2PO4	kg	0	0	0	0	0	0	0
Na2HP4	kg	0	0	0	0	0	0	0
MgSO4	kg	0	0	0	0	0	0	0
(NH4)5[Fe(C6H4O7)2]	kg	0	0	0	0	0	0	0
CaCl2	kg	0	0	0	0	0	0	0
NH2SO4	kg	0	0	0	0	0	0	0
Yeast extract	kg	0	0	0	0	0	0	0
Meat extract	kg	0	0	0	0	0	0	0
Peptone	kg	0	0	0	0	0	0	0
(NH4)2SO4	kg	0	0	0	0	0	0	0
Agar	kg	0	0	0	0	0	0	0
Biomasa	kg	0	0	0	0	0	0	0
Agua destilada	kg	0	0	0	0	0	0	0
NaCl	kg	0	0	0	0	0	0	0
NaOH	kg	0	0	0	0	0	0	0
PHB	kg	1,05	0	1,05	0	1,05	0	0
Etanol	kg	0,79	0,79	0	0	0	0	0
Ácido acético	kg	0	0	0	22,14	22,14	22,14	0
Biofilm	kg	0	0	0	0	0	0	1,05
Aire	kg	0	0	0	0	0	0	0
CO2	kg	0	0	0	0	0	0	0
Total corriente	kg	5,83	4,78	1,05	22,14	23,19	22,14	1,05

Sustancia	Unidades	50	51	52	53	54	55	56
Papel	kg	0	0	0	0	0	0	0
Agua	kg	0	0	0	0	0	0	0
H2O2	kg	0	0	0	0	0	0	0
Celulasa	kg	0	0	0	0	0	0	0
b-glucosidasa	kg	0	0	0	0	0	0	0
hemicelulasa	kg	0	0	0	0	0	0	0
glucosa	kg	0	0	0	0	0	0	0
xilosa	kg	0	0	0	0	0	0	0
lignina	kg	0	0	0	0	0	0	0
cenizas	kg	0	0	0	0	0	0	0
KH2PO4	kg	0	0	0	0	0	0	0
Na2HP4	kg	0	0	0	0	0	0	0
MgSO4	kg	0	0	0	0	0	0	0
(NH4)5[Fe(C6H4O7)2]	kg	0	0	0	0	0	0	0
CaCl2	kg	0	0	0	0	0	0	0
NH2SO4	kg	0	0	0	0	0	0	0
Yeast extract	kg	0	0	0	0	0	0	0
Meat extract	kg	0	0	0	0	0	0	0
Peptone	kg	0	0	0	0	0	0	0
(NH4)2SO4	kg	0	0	0	0	0	0	0
Agar	kg	0	0	0	0	0	0	0
Biomasa	kg	0	0	0	0	0	0	0
Agua destilada	kg	0	0	0	0	0	0	0
NaCl	kg	0	0	0	0	0	0	0
NaOH	kg	0	0	0	0	0	0	0
PHB	kg	0	0	0	0	0	0	0
Etanol	kg	0	0	0	0	0	0	0
Ácido acético	kg	0	0	0	0	0	0	0
Biofilm	kg	0	0	0	0	0	0	0
Aire	kg	0,03	0	0,33	0	1,67	0	8,36

CO2	kg	0	0,01	0	0,07	0	0,35	0
Total corriente	kg	0,03	0,01	0,33	0,07	1,67	0,35	8,36

Sustancia	Unidades	57	58	59	60	61	62
Papel	kg	0	0	0	0	0	0
Agua	kg	0	0	0	0	0	0
H2O2	kg	0	0	0	0	0	0
Celulasa	kg	0	0	0	0	0	0
b-glucosidasa	kg	0	0	0	0	0	0
hemicelulasa	kg	0	0	0	0	0	0
glucosa	kg	0	0	0	0	0	0
xilosa	kg	0	0	0	0	0	0
lignina	kg	0	0	0	0	0	0
cenizas	kg	0	0	0	0	0	0
KH2PO4	kg	0	0	0	0	0	0
Na2HP4	kg	0	0	0	0	0	0
MgSO4	kg	0	0	0	0	0	0
(NH4)5[Fe(C6H4O7)2]	kg	0	0	0	0	0	0
CaCl2	kg	0	0	0	0	0	0
NH2SO4	kg	0	0	0	0	0	0
Yeast extract	kg	0	0	0	0	0	0
Meat extract	kg	0	0	0	0	0	0
Peptone	kg	0	0	0	0	0	0
(NH4)2SO4	kg	0	0	0	0	0	0
Agar	kg	0	0	0	0	0	0
Biomasa	kg	0	0	0	0	0	0
Agua destilada	kg	0	0	0	0	0	0
NaCl	kg	0	0	0	0	0	0
NaOH	kg	0	0	0	0	0	0
PHB	kg	0	0	0	0	0	0
Etanol	kg	0	0	0	0	0	0

Ácido acético	kg	0	0	0	0	0	0
Biofilm	kg	0	0	0	0	0	0
Aire	kg	0	33,46	0	161,07	0	5760
CO2	kg	1,76	0	7,05	0	33,92	0
Total corriente	kg	1,76	33,46	7,05	161,07	33,92	5760

ANEXO 2

MUESTRA DE CÁLCULO DE FLUJO DE AIRE EN SECADOR

$$\dot{m}_{ai} = \frac{\dot{m}_w * (Cp_w * \Delta T_w + h_{fg})}{n_s * Cp_{ai} * \Delta T_{ai}}$$

$$\dot{m}_{ai} = \frac{\left(\frac{116.8 \text{ kg}}{8 \text{ h} * 3600 \text{ s}}\right) * \left(4.186 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} * \text{K}}\right) * (333.15 \text{ K} - 286.25 \text{ K}) + 2258.36 \text{ kJ/kg}}{1 * 1.05 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} * \text{K}} * (333.15 \text{ K} - 286.25 \text{ K})}$$

$$\dot{m}_{ai} = 0.20 \text{ kg/s}$$

ANEXO 3

MUESTRA DE CÁLCULO DE CONSUMO ENERGÉTICO

$$\text{Consumo energético (kW * h)} = \text{Potencia (kW)} * \text{Tiempo(h)}$$

$$\text{Consumo energético (kW * h)} = 0,43 \text{ kW} * 0,17 \text{ h}$$

$$\text{Consumo energético (kW * h)} = 0,07$$

ANEXO 4

BALANCE DE ENERGÍA PARA SECADORES Y PLACAS DE CALENTAMIENTO

Equipo	Corriente	Sustancia	Cpi(kJ/kgK) [121]–[125]	Fracción másica (Ni)	T° (K)	Q (kW)
DE-101	6	Papel	1,400	0,290323	286,25	102,1807
		Agua	4,186	0,70791		
		H2O2	2,619	0,001768		
	7	H2O2	2,619	0,002491	333,15	
		Agua	4,186	0,990579		
	DE-101	9	Papel	1,400	1	333,15
43		PHB	1,800	0,179795	294,7	
		Etanol	2,430	0,137254		
		Agua	4,186	0,684932		
44		Etanol	2,430	0,164927	286,25	
		Agua	4,186	0,835073		
45	PHB	1,800	1	286,25		
DE-102	47	PHB	1,800	0,045278	319,7	60,7855
		Ácido acético	2,1800	0,954722		
		48	Ácido acético	2,1800		
	49	PHB	1,800	1	353,13	

ANEXO 5

MUESTRA DE CÁLCULO DE SALARIO MENSUAL DE UN OPERARIO EN JORNADA DIURNA LOS DOMINGOS

*Salario mensual (COP) = Salario mínimo hora * Tiempo trabajado(h)*

*Salario mensual (COP) = 6624,67 * 32h*

Salario mensual (COP) = 211989,44

ANEXO 6

MUETSRA DE CÁLCULO DE APORTES TOTALES DE NÓMINAS A PENSIÓN

Aporte total nómina (COP)

$$= \text{Porcentaje de aporte (\%)} * \sum \text{salarios mensuales operarios (COP)}$$

Aporte total nómina (COP)

$$= 12\% * \sum (908526 * 6) + (333126,2 * 2) + (343725,64 * 2) + (349782,52 * 2)$$

$$\text{Aporte total nómina (COP)} = 900530,96$$

ANEXO 7

RECOMENDACIONES

De acuerdo con las propiedades fisicoquímicas y mecánicas contrastadas de la bibliografía y su semejanza al PP, se recomiendan aplicaciones similares a los de este plástico convencional en los que el biofilm no requiera una gran capacidad de alargamiento ya que el del PHB es mucho menor al del PP, Dichos usos pueden ser envolturas, bolsas y empaques de uso industrial, para repuestos y elementos complementarios de otros productos, para distintos tipos de productos como prendas de vestir, productos de papelería, accesorios y packaging primario para alimentos como cereales, galletas y dulces, Además, es probable que el biofilm requiera de operaciones de procesado adicionales para desarrollar este tipo de actividades como puede ser el termosellado, por tanto, se recomienda la investigación de operaciones de transformación acordes al material,

Realizar la experimentación con el objetivo de poner en práctica el proceso de producción establecido y verificar las propiedades fisicoquímicas y mecánicas del producto reportadas en la bibliografía,

Investigar formas para aumentar el rendimiento en la producción de PHB en la fermentación, variando las condiciones de esta en factores como el sustrato, el microorganismo o el ambiente de fermentación, De igual forma, buscar reducir el tiempo de producción por lote, especialmente en etapas de larga duración como la hidrólisis y el tren de inóculo,

Valorar la reutilización del agua del proceso pues es el reactivo más usado durante el mismo, haciendo énfasis en la separada en la centrifugación, la cual posee residuos orgánicos de la biomasa que contiene el PHB y es donde existe una mayor cantidad,

Evaluar la implementación de otros tipos de materia prima que sean también fuente de azúcares para el microorganismo tratado como residuos agroindustriales o papel de otras fuentes, y que, además, pueda facilitar o incluso eliminar la operación de hidrólisis, Por otra parte, también realizar la búsqueda de fuentes que puedan entregar una mayor cantidad del mismo tipo de materia prima utilizada en el presente proyecto para de igual forma obtener una mayor cantidad de biofilm,

Realizar la investigación correspondiente a los costos asociados a la adquisición de materia prima en portales e interfaces de distribuidores locales (colombianos) con el fin de comprobar si

es posible evitar procesos de importación de sustancias implementadas en el proceso de producción, lo cual contribuiría a la disminución de costos de inversión del proyecto.

Caracterizar a nivel fisicoquímico la materia prima (papel reciclado) obtenida de la empresa International House Bogotá y realizar un análisis a profundidad de la influencia de la composición de la tinta presente en el material y de la composición del papel en las propiedades finales del biofilm.

Analizar las posibles pérdidas de masa o alteraciones en las características finales del biofilm que pueda ocasionar el proceso de extracción y transformación del PHB al implementar sustancias como NaCl, NaOH, Ácido Acético y Etanol.