



SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
TECNOLÓGICO NACIONAL DE MEXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE BOCA DEL RÍO

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

“EVALUACIÓN DE LA CALIDAD FÍSICOQUÍMICA DE RESIDUOS
AGROINDUSTRIALES PARA LA GENERACIÓN DE COMPUESTOS
BIOPOLÍMEROS”
TESIS

QUE COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL

PRESENTA

GUADALUPE DOLORES GUTIÉRREZ
SAMPIER

DIRECTOR DE TESIS
DRA. ITZEL GALAVIZ VILLA

CO-DIRECTOR
DR. SALVADOR PARTIDA SEDAS
ASESOR
DRA. CINTHYA VILLALOBOS SOSA
ASESOR
DRA. MAGNOLIA G. SALCEDO
GARDUÑO

MARZO DEL 2022

BOCA DEL RÍO, VERACRUZ.



Km. 12 Carretera Veracruz-Córdoba, Boca del Río, Ver. C.P. 94290.
Tel. (229) 690 5010 dir01_bdelrio@tecnm.mx | tecnm.mx | bdelrio.tecnm.mx





ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

Número Registro: **A-01107-220620**

En la ciudad de Boca del Río, Ver., siendo las 10:00 horas del día 11 del mes de marzo de 2022 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Consejo del Posgrado de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental del ITBOCA, para examinar la Tesis de Grado titulada:

“EVALUACIÓN DE LA CALIDAD FISICOQUÍMICA DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES PARA LA GENERACIÓN DE COMPUESTOS BIOPOLÍMEROS”

Que presenta el (la) alumno(a):

GUADALUPE DOLORES GUTIERREZ SAMPIERI

Aspirante al Grado de:

Maestro en Ciencias en Ingeniería Ambiental

Después de escuchar las opiniones sobre el documento escrito e intercambiar puntos de vista, los miembros de la Comisión manifestaron SU APROBACIÓN, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes para su defensa ante el jurado correspondiente.

LA COMISIÓN REVISORA:

DRA. ITZEL GALAVIZ VILLA
Director

DR. SALVADOR PARTIDA SEDAS
Asesor

DRA. CINTHYA ALEJANDRA SOSA VILLALOBOS
Asesor

DRA. MAGNOLIA G. SALCEDO GARDUÑO
Asesor



Instituto Tecnológico de Boca del Río
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Boca del Río, Ver **15/MARZO/2022**

ASUNTO: AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

**GUADALUPE DOLORES GUTIERREZ SAMPIERI
PASANTE DEL PROGRAMA MAESTRÍA EN
CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL
PRESENTE**

De acuerdo con el fallo emitido por los integrantes del Comité Revisor de la **TESIS PARA OBTENCIÓN DE GRADO**, desarrollada por usted cuyo título es:

EVALUACIÓN DE LA CALIDAD FÍSICOQUÍMICA DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES PARA LA GENERACIÓN DE COMPUESTOS BIOPOLÍMEROS”

Esta División de Estudios de Posgrado e Investigación le concede **AUTORIZACIÓN** para que proceda a su impresión.

ATENTAMENTE
Excelencia en Educación Tecnológica®
Por nuestros mares responderemos

**DR. JUAN DAVID GARAY MARIN
JEFE DE LA DIVISION DE ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACIÓN**



c.c.p. Coordinación del Programa MCIAMB
c.c.p. Expediente



Km. 12 Carretera Veracruz-Córdoba, Boca del Río, Ver. C.P. 94290.
Tel. (229) 690 5010 dir01_bdelrio@tecnm.mx | tecnm.mx | bdelrio.tecnm.mx

3



LICENCIA DE USO OTORGADA POR Guadalupe Dolores Gutiérrez Sampieri, de nacionalidad Mexicana mayor de edad, con domicilio ubicado en Prolongación Av. 5 poniente, lote 1, manzana 9, Colonia 2 de noviembre, Huatusco, Veracruz, en mi calidad de titular de los derechos patrimoniales y morales y autor de la tesis denominada **“EVALUACIÓN DE LA CALIDAD FISCOQUÍMICA DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES PARA LA GENERACIÓN DE COMPUESTOS BIOPOLÍMEROS”** en adelante **“LA OBRA”** quien para todos los fines del presente documento se denominará **“EL AUTOR Y/O EL TITULAR”**, a favor del **Instituto Tecnológico de Boca del Río** del Tecnológico Nacional de México, la cual se registrá por las clausulas siguientes:

PRIMERA –OBJETO: “EL AUTOR Y/O TITULAR”, mediante el presente documento otorga al Instituto Tecnológico de **Boca del Río** del Tecnológico Nacional de México, licencia de uso gratuita e indefinida respecto de **“LA OBRA”**, para almacenar, preservar, publicar, reproducir y/o divulgar la misma, con fines académicos, por cualquier medio en forma física y a través del repositorio institucional y del repositorio nacional, éste último consultable en la página: (<https://www.repositorionacionalcti.mx/>).

SEGUNDA - TERRITORIO: La presente licencia se otorga, de manera no exclusiva, sin limitación geográfica o territorial alguna, de manera gratuita e indefinida.

TERCERA -ALCANCE: La presente licencia contempla la autorización para formato uso de **“LA OBRA”** en cualquier formato o soporte material y se extiende a la utilización, de manera enunciativa más no limitativa a los siguientes medios: óptico, magnético, electrónico, virtual (red), mensaje de datos o similar conocido por conocerse.

en medio óptico, magnético, electrónico, en red, mensajes de datos o similar, conocido o por conocerse.

CUARTA – EXCLUSIVIDAD: La presente licencia de so aquí establecida no implica exclusividad en favor del Instituto Tecnológico de **Boca del Río**; por lo tanto, **“EL AUTOR Y/O TITULAR”** conserva los derechos patrimoniales y morales de **“LA OBRA”**, objeto del presente documento.

QUINTA – CRÉDITOS: El Instituto Tecnológico de **Boca del Río** y/o el Tecnológico Nacional de México reconoce que el **“AUTOR Y/O TITULAR”** es el único, primigenio y perpetuo titular de los derechos morales sobre **“LA OBRA”**; por lo tanto, siempre deberá otorgarle los créditos correspondientes por la autoría de la misma.

SEXTA – AUTORÍA: **“EL AUTOR Y/O TITULAR”** manifiesta ser el único titular de los derechos de autor que derivan de **“LA OBRA”** y declara que el material objeto del presente fue realizado por él, sin violentar o usurpar derechos de propiedad intelectual de terceros; por lo tanto, en caso de controversia sobre los mismos, se obliga a ser el único responsable.

Dado en la Ciudad de Boca del Río, Veracruz, a los 08 días del mes de marzo de 2022.

“EL AUTOR Y/O TITULAR” “EL INSTITUTO TECNOLÓGICO DE BOCA DEL RÍO”



Km. 12 Carr. Veracruz-Córdoba, Boca del Río, Ver.
C.P. 94290. Tel. (229) 690 5010 ext. 102
dir01_bdelrio@tecnm.mx
tecnm.mx | bdelrio.tecnm.mx



RESUMEN

Los residuos agroindustriales tienen su origen en los cultivos y no son aprovechados para el consumo humano; incluyendo materiales como: tallos, hojas, cáscaras y semillas, provenientes de cereales, frutas, verduras, entre otros. Se generan aproximadamente 3,045 millones de toneladas por año de residuos agroindustriales. El café (*Coffea spp.*) y caña de azúcar (*Saccharum spp.*) son principales cultivos industriales en México; de ambas industrias se generan diversos residuos biomásicos, destacando la cascarilla de café y el bagazo de caña; ambos residuos son fuente principal de componentes estructurales como la lignina, celulosa y hemicelulosa. Por lo anterior, se determinaron las características fisicoquímicas de la celulosa extraída de los residuos agroindustriales del café (*Coffea spp.*) y caña de azúcar (*Saccharum spp.*), para formulación de biopolímeros. Se realizó la extracción de celulosa de dichos residuos por medio de tratamientos químicos por blanqueo, hidrólisis álcali y ácida, se hizo una caracterización físico-química de los mismos, obteniendo altos porcentajes de α -celulosa de alta pureza de la cascarilla de café (88.80 %), y del bagazo de caña de azúcar (83.28 %), así como mayor rendimiento de la celulosa extraída de la cascarilla de café (32.75 %). Debido a esto, y a las características morfológicas y fisicoquímicas de la celulosa de la cascarilla de café se desarrollaron dos tipos de biopolímeros de composición: (A) 100 % celulosa de cascarilla de café y (B) 75% de fibra de bagazo de caña y 25 % celulosa de cascarilla de café. Se encontró que el biopolímero (A) compuesto de 100 % celulosa presentó las mejores características fisicoquímicas de humedad celulósica, vapor de agua y solubilidad; para el desarrollo de biopolímeros. La prueba de biodegradabilidad indicó que bajo condiciones controladas de temperatura y humedad relativa, los biopolímeros A y B son compostables en un periodo menor a cuatro meses (110 días); biodegradándose hasta en un 84.41 y 77.49% correspondientes al biopolímero A y B, respectivamente; convirtiéndose la mayor parte de la masa de ambas formulaciones en materia orgánica y CO₂.

Palabras clave: Residuos agrícolas, celulosa, cascarilla de café, bagazo de caña de azúcar, biopolímeros.

ABSTRACT

Agro-industrial wastes originate from crops and are not used for human consumption, including materials such as stems, leaves, husks and seeds from cereals, fruits, vegetables, among others. Approximately 3,045 million tons of agroindustrial waste are generated each year. Coffee (*Coffea* spp.) and sugarcane (*Saccharum* spp.) are the main industrial crops in Mexico; both industries generate diverse biomass residues, especially coffee husks and sugarcane bagasse; both residues are the main source of structural components such as lignin, cellulose and hemicellulose. Therefore, the physicochemical characteristics of cellulose extracted from coffee (*Coffea* spp.) and sugarcane (*Saccharum* spp.) agroindustrial residues were determined for the formulation of biopolymers. The extraction of cellulose from these residues was carried out by means of chemical treatments by bleaching, alkali and acid hydrolysis. A physical-chemical characterization of these residues was made, obtaining high percentages of high purity cellulose from coffee husk (88.80 %) and sugar cane bagasse (83.28 %), as well as a higher yield of cellulose extracted from coffee husk (32.75 %). Due to this, and to the morphological and physicochemical characteristics of coffee husk cellulose, two types of biopolymers of composition were developed: (A) 100 % coffee husk cellulose and (B) 75% cane bagasse fiber and 25 % coffee husk cellulose. It was found that the biopolymer (A) composed of 100 % cellulose presented the best physicochemical characteristics of cellulosic moisture, water vapor and solubility; for the development of biopolymers. The biodegradability test indicated that under controlled conditions of temperature and relative humidity, biopolymers A and B are compostable in a period of less than four months (110 days), biodegrading up to 84.41 and 77.49% corresponding to biopolymer A and B, respectively; converting most of the mass of both formulations into organic matter and CO₂.

Key words: Agricultural residues, cellulose, coffee husk, sugar cane bagasse, biopolymers.

Dedicatoria

A mis admirables padres por haberme forjado como la mujer que soy actualmente, llena de valores y virtudes; todos mis logros se los debo a ustedes ya que me han enseñado a luchar y alcanzar mis metas, que a pesar de las adversidades siempre se sale adelante; me enseñaron los mejores ejemplos de vida y gracias a ustedes a su interminable paciencia, consejos, sabiduría y apoyo incondicional aprendí que el mejor regalo que me pudieron dar es la educación y la formación profesional. Eternamente, Gracias.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca otorgada para los estudios de Posgrado.

Al Tecnológico Nacional de México (TecNM) quien a través de la División de Estudios de Posgrado e Investigación del Instituto Tecnológico de Boca del Río me brindaron la oportunidad para formarme como Maestro en Ciencias en Ingeniería Ambiental, generación 2020-2022.

A la Dra. Itzel Galaviz Villa por brindarme su apoyo y permitirme formar parte de su equipo de trabajo a lo largo del desarrollo de este proyecto, por su orientación y conocimientos adquiridos para las mejoras en la redacción de la presente tesis.

A mis asesores de esta investigación: Dr. Salvador Partida Sedas, Dra. Magnolia Gricel Salcedo Garduño por sus valiosas aportaciones y sugerencias.

A todos los miembros del Consejo el Posgrado de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental del ITBOCA por los conocimientos compartidos.

INDICE

	Pág.
I. INTRODUCCIÓN	13
II. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL	15
2.1 Residuos sólidos	15
2.1.1 Clasificación de residuos	15
2.1.1.1 Residuos sólidos industriales	15
2.1.1.2 Clasificación de los residuos sólidos industriales	15
2.2 Agroindustria	16
2.2.1 Residuos agroindustriales	16
2.2.1.2 Impacto ambiental de los residuos agroindustriales	17
2.2.1.3 Producción de residuos agroindustriales a nivel mundial y nacional	17
2.3 Industria del café (<i>Coffea</i> spp.)	17
2.3.1 Residuos agroindustriales del café	18
2.3.2 Composición química y estructura del fruto de café	19
2.4 Industria de la caña de azúcar (<i>Saccharum</i> spp.)	21
2.4.1 Residuos agroindustriales de la caña de azúcar (<i>Saccharum</i> spp.)	22
2.4.2 Composición química de la caña de azúcar	22
2.5 Componentes principales de los residuales agroindustriales	24
2.5.1 Celulosa, hemicelulosa y lignina	24
2.5.2 Métodos de extracción	25
2.6 Plásticos o polímeros	26
2.7 Biopolímeros	26
2.8 Biodegradabilidad	28
2.8.1 Etapas de biodegradación	30
2.8.2 Biodegradabilidad en condiciones de composta	31
2.8.2.1 Vermicomposteo	31
III. MARCO DE REFERENCIA	33
3.1 Antecedentes	34
3.2 Frontera del conocimiento	34
IV. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	36
4.1 Pregunta de investigación	38
4.2 Justificación	38
V. HIPÓTESIS	39
VI. OBJETIVOS	39
6.1 Objetivo General	39
6.1.1 Objetivos Particulares	39
VII. MATERIALES Y MÉTODOS	40
7.1 Caracterización de la materia prima (<i>Coffea</i> spp.)	40
7.1.1 Extracción de celulosa y fibra	40
7.2 Pretratamiento general determinación de humedad por el método gravimétrico AOAC (925.10)	40
7.2.1 Determinación porcentual de celulosa	41
7.3 Extracción de celulosa	41
7.3.1 Extracción de celulosa para cascarilla de café (<i>Coffea</i> spp.)	42

7.3.2 Extracción de celulosa para bagazo de caña de azúcar (<i>Saccharum spp.</i>)	43
7.3.3 Rendimiento	44
7.4 Caracterización de la celulosa obtenida de bagazo y cascarilla	44
7.4.1 Determinación de humedad método gravimétrico AOAC (925.10)	44
7.4.2 Determinación de cenizas método AOAC 923.03	45
7.4.3 Contenido de alfa celulosa (NORMA TAPPI T 203 m-58)	45
7.5 Método de extracción de fibra para bagazo	46
7.6 Elaboración del biopolímero	46
7.6.1 Caracterización de los biopolímeros	47
7.6.2 Espesor	48
7.6.3 Humedad	48
7.6.4 Permeabilidad al vapor de agua	48
7.6.5 Solubilidad en agua	49
7.6.6 Caracterización de las laminas de biopolímero	50
7.6.7 Porcentaje de cenizas de los biopolímeros	50
7.6.8 Determinación de carbono orgánico %CO y materia orgánica %MO	50
7.7 Diseño experimental	51
7.7.1 Prueba de biodegradabilidad ASTM D5988-12	51
7.8 Análisis estadístico	52
VIII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	54
8.0 Caracterización fisicoquímica de los residuos agroindustriales cascarilla de café (<i>Coffea spp.</i>) y bagazo de caña de azúcar (<i>Saccharum spp.</i>).	54
8.1 Rendimiento	54
8.2 Caracterización fisicoquímica de la Celulosa	55
8.2.1 Humedad	55
8.2.2 Cenizas	55
9.3.3 α -Celulosa	55
9.4. Formulación de biopolímeros	56
9.4.1 Caracterización fisicoquímica	56
9.4.1.1 Humedad	57
9.4.1. Permeabilidad de Vapor de agua	57
9.4.2 Solubilidad en agua	59
9.5 Prueba de biodegradabilidad ASTM D5988-12	60
IX. CONCLUSIONES	62
X. ANEXO I	64
XI. ANEXO II	74
1.0 Elaboración de vermicomposta	74
2.0. Caracterización del suelo	75
2.1. pH del suelo	75
2.2. Humedad en suelo	75
2.3. Porcentaje de cenizas del suelo	76
2.4. Determinación de carbono orgánico %CO y materia orgánica %MO	76
2.5. Caracterización del humus de lombriz	77
XII. LITERATURA CITADA	78

INDICE DE CUADROS

		Pág.
Cuadro 1.	Composición química según la especie.	19
Cuadro 2.	Composición química del café cereza.	21
Cuadro 3.	Composición química de la caña de azúcar.	23
Cuadro 4.	Composición química y mineral de los subproductos de la caña de azúcar.	24
Cuadro 5.	Formulaciones de los biopolímeros.	47
Cuadro 6.	Caracterización fisicoquímica de los residuos agroindustriales cascarilla de café (<i>Coffea</i> spp.) y bagazo de caña de azúcar (<i>Saccharum</i> spp.).	54
Cuadro 7.	Rendimiento de la celulosa extraída de los residuos agroindustriales.	54
Cuadro 8.	Características fisicoquímicas de la celulosa de bagazo de caña de azúcar (<i>Saccharum</i> spp.) y cascarilla de café (<i>Coffea</i> spp.).	55
Cuadro 9.	Características fisicoquímicas de los biopolímeros formulados.	56
Cuadro 10.	Porcentaje de biodegradabilidad de los biopolímeros formulados durante 110 días de experimento.	61
Cuadro 11.	Determinación de características fisicoquímicas del humus de lombriz.	77

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Estructura del grano de café.	20
Figura 2. Pretratamiento en la matriz lignocelulítica.	25
Figura 3. Ubicación de los sitios de muestreo	33
Figura 4. Diseño experimental para el análisis de biodegradabilidad de las formulaciones de biopolímeros. [A],[B], [C].	52
Figura 5. Análisis del contenido de humedad (%) de los biopolímeros formulados ($p < 0.05$). [A] 100 % celulosa de cascarilla de café; [B] 75 % de fibra de bagazo de caña, y 25 % de celulosa de cascarilla de café.	58
Figura 6. Análisis de permeabilidad de vapor de agua de los biopolímeros formulados ($p < 0.05$). [A] 100 % celulosa de cascarilla de café; [B] 75 % de fibra de bagazo de caña, y 25 % de celulosa de cascarilla de café.	58
Figura 7. Análisis de la solubilidad en agua de los biopolímeros formulados ($p < 0.05$). [A] 100 % celulosa de cascarilla de café; [B] 75 % de fibra de bagazo de caña, y 25 % de celulosa de cascarilla de café.	60
Figura 8. Pretratamiento del bagazo de caña de azúcar.	64
Figura 9. Pretratamiento de cascarilla de café.	64
Figura 10. Cascarilla de café (<i>Coffea spp.</i>).	65
Figura 11. Tamizado de residuos agroindustriales.	66
Figura 12. Filtrado de cascarilla tratada con NaOH.	66
Figura 13. Primer blanqueo de fibra con NaCl ₂ .	67
Figura 14. Filtrado de la fibra blanqueada.	67
Figura 15. Fibra completamente blanqueada.	67
Figura 16. Celulosa de cascarilla de café.	67
Figura 17. Celulosa de cascarilla de café pulverizada.	67
Figura 18. Tratamiento con NaOH.	67
Figura 19. Filtración de bagazo tratado con NaOH.	68
Figura 20. Blanqueo de bagazo con NaCl ₂ .	68
Figura 21. Filtrado de bagazo blanqueado con NaCl ₂ .	68
Figura 22. Celulosa de bagazo de caña de azúcar.	68
Figura 23. Celulosa de bagazo pulverizada.	68
Figura 24. Fibra extraída de bagazo	68
Figura 25. Fibra extraída de cascarilla de café.	69
Figura 26. Proceso de elaboración de biopolímeros.	69
Figura 27. Elaboración de biopolímero composición 100 % celulosa.	69
Figura 28. Elaboración de biopolímero composición 75 % Fibra y 25 % celulosa.	70
Figura 29. Aspectos de las formulaciones de biopolímeros.	71
Figura 30. Biopolímero 100 % Celulosa.	72
Figura 31. Biopolímero 25-75 % Celulosa y Fibra.	72
Figura 32. Evidencias del Proceso de biodegradabilidad.	73

I. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, la urbanización e industrialización son las principales problemáticas mundiales, modifican los ecosistemas naturales, provocando el reemplazo de los medios naturales por medios habitacionales e industriales afectando la biodiversidad. Algunas de las causas principales de la contaminación ambiental son el complejo sistema urbano y el desarrollo industrial para el abasto de alimentos, los cuales aumentan la generación de desechos sólidos, efluentes líquidos, y contaminación atmosférica, sonora y electromagnética (Castellanos, 2013). La contaminación ambiental provoca daños a la salud, a la vida, a la biodiversidad, y modifica la calidad del agua, aire y suelo (Alfaro, 2001). Para dar solución a esta problemática, es necesario ampliar el conocimiento interdisciplinario en una búsqueda eficiente de alternativas sustentables que respondan a las demandas de la sociedad (Castellanos, 2013).

Los plásticos son materiales que actualmente se han vuelto indispensables para la sociedad; están elaborados de compuestos poliméricos con alto peso molecular; a ciertas temperaturas es posible transformarlos hasta alcanzar el estado deseado, son versátiles, de bajo costo y de fácil acceso (Navarro et al., 2019). Sin embargo, la industria mundial del plástico ha aumentado considerablemente en los últimos años debido al incremento poblacional y cambios de consumo en la sociedad. La producción de plásticos entre 2008 y 2016 creció 90 millones de toneladas, pasando de 245 millones a 335 millones de toneladas. Se estima que para el año 2050 se alcanzará un volumen de mil millones de toneladas. Los plásticos de mayor producción a nivel mundial son polipropileno (19 %), polietilenos de baja densidad (17 %) y alta densidad (12 %), policloruro de vinilo (11 %), poliestirenos (7.5 %), poliuretanos, polietileno tereftalato (6.5 %) y otros (20 %). A nivel mundial, Asia es el principal productor de plásticos (CamBioTec, 2018).

En cuanto a consumo de plásticos, México ocupa el lugar número doce a nivel mundial. La industria del plástico en el país se ha mantenido en crecimiento con un promedio anual del 3.03 %. Considerando el crecimiento de la economía mexicana en promedio anual de 2.92 %, la industria del plástico en México aumentó un 20.4 % entre el año 2003 y 2013 (Pérez, 2014). La generación per cápita en 2015 fue de 1.2 kg al día, es decir, anualmente se generaron 53.1 toneladas de plástico (Navarro et al., 2019).

Según Navarro et al. (2019), los plásticos tardan en promedio entre 150 y 500 años en lograr su completa degradación; aunque la manera de degradación es distinta para cada material y entorno. La aglomeración de plásticos en distintos ecosistemas, debido a su mal manejo como residuos, incrementa cada año, provocando la posible formación de microplásticos.

Los biopolímeros son una alternativa a esta problemática ambiental, son considerados como la nueva generación de plástico que contribuirá a la disminución del impacto ambiental (Bilo et al., 2018). Son fabricados a partir de recursos renovables de origen natural como el almidón, fibra o celulosa, permitiendo la biodegradación en periodos menores a un año, con generación de CO₂, agua y biomasa, como producto final (Barrera, 2015).

Los residuos agroindustriales provienen de los cultivos y no son aprovechados para el consumo humano; dentro de esta categoría se incluyen materiales como: tallos, hojas, cáscaras y semillas, provenientes de cereales, frutas, verduras, entre otros (Nigam y Pandey, 2009).

La producción mundial de residuos agroindustriales es de gran amplitud, aproximadamente se generan 3,045 millones de toneladas por año (Badrán, Ocampo, Cruz, Trejo, y Gutiérrez, 2019). Son fuente principal de componentes estructurales como la lignina, celulosa y hemicelulosa. Los cuales varían dependiendo del tipo de residuo, son de fácil acceso ya que son generados a partir de diversos procesos agrícolas de alta demanda (Cabrera et al., 2014). En México, se generan aproximadamente 70 millones de toneladas al año de residuos agroindustriales, en donde el 79.4 % corresponde a residuos primarios, es decir, residuos de cereales como es el caso de trigo, maíz, residuos de frutas, cáscaras y semillas; residuos de cosechas como forrajes o forestales. El 20.6 % restante, corresponde a restos de cultivos industriales como el bagazo de arroz, caña de azúcar o café (Vega, Brizuela, Togo, y Rodríguez, 2019). Por tanto, el presente proyecto tiene el objetivo de evaluar la calidad físicoquímica los residuos agroindustriales del café (*Coffea spp.*) y caña de azúcar (*Saccharum spp.*) para la obtención de compuestos biopolímeros.

II. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

2.1 Residuos sólidos

Los residuos sólidos son el resultado de las actividades antropogénicas, representados en forma sólida; y algunos son considerados de un solo uso, sin embargo; otros de estos residuos pueden ser reutilizados para fines industriales o para la obtención de energéticos (Toala y Sarmiento, 2019b). Aquellos denominados como basura, son residuos que no pueden tener otra utilidad y se depositan en un lugar apropiado para evitar problemas ambientales o sanitarios (Rodríguez y Páez, 2019). En México, y a nivel mundial afirma Ojeda (2019), el inadecuado manejo de los residuos es considerado como un reto ambiental público y político. Cabe señalar, que el inadecuado manejo de residuos no solo tiene efectos ambientales o de salud pública, sino también en la sustentabilidad de los recursos naturales.

2.1.1 Clasificación de residuos

Los residuos sólidos por su origen se pueden clasificar en distintos tipos como son; domésticos, industriales, agrícolas, comerciales, hospitalarios no peligrosos y de la construcción (Aguilar et al., 2018).

2.1.1.1 Residuos sólidos industriales

Son residuos producto de las actividades industriales y son clasificados en aprovechables y no aprovechables, siendo los últimos los denominados como basura. Un residuo aprovechable es aquel material, objeto o elemento sólido que concluye su vida útil para el productor, pero es útil para su reincorporación a algún proceso productivo. Cabe destacar que esta reincorporación sólo es respectivamente para residuos sólidos industriales (Rodríguez y Páez, 2019).

2.1.1.2 Clasificación de los residuos sólidos industriales

De acuerdo con Rodríguez y Páez (2019), estos residuos se clasifican en peligrosos y no peligrosos. Los peligrosos son caracterizados como desechos o residuos corrosivos, reactivos, tóxicos, inflamables, infecciosos o radiactivos; que ponen en riesgo la salud humana y ambiental. En cuanto a la composición los residuos sólidos industriales son clasificados como orgánicos e inorgánicos. Los residuos orgánicos son los de tipo biológico, es decir, la denominada biomasa; como es el caso

de materia orgánica proveniente de seres vivos o del tipo vegetal o alimenticio denominados residuos agroindustriales. Los residuos inorgánicos son polímeros o plásticos, y cualquier material sintético, de acuerdo a su condición pueden catalogarse en sólidos, líquidos o gaseosos.

2.2 Agroindustria

La agroindustria, es considerada como una actividad propiamente económica que integra la producción agrícola con la industrial para el desarrollo de productos o materias primas que son consignadas a la producción. Es considerada mundialmente por su producción y su desarrollo económico, sin embargo; la gran cantidad de residuos que genera contribuyen directamente al deterioro ambiental, debido a sus procesos de producción, manejo, procesamiento y comercialización. Ya que genera gran cantidad de subproductos o residuos, que muchas veces ocasionan problemáticas en su disposición final (Cury et al., 2017).

2.2.1 Residuos agroindustriales

Se estima que los residuos agroindustriales son los recursos renovables más importantes para la generación de actividades comerciales y sociales (Cabrera et al., 2016). Los residuos agroindustriales son aquellos provenientes de cultivos y que no tienen uso o consumo humano, tales como; cáscaras, tallos, hojas y semillas derivadas de elementos de la naturaleza, como es el caso de cereales, frutas, legumbres, entre otros (Nigam y Pandey, 2009). Es decir, son referidos a la biomasa de origen vegetal compuesta de celulosa, hemicelulosa y lignina. La cantidad presente de estos componentes depende principalmente del tipo de residuo del que se trate (Lin y Tanaka, 2006).

Generalmente las características de los residuos agroindustriales son muy variadas y dependen de la materia prima y del proceso del que provienen, sin embargo; comparten una característica principal, el contenido de materia orgánica o biomasa conformada por diversos porcentajes de celulosa, lignina, hemicelulosa y pectina. Son denominados residuos orgánicos por la característica particular de estar compuestos de materia orgánica (Nigam y Pandey, 2009). Existe la necesidad de aprovechar los residuos agroindustriales para la transformación de un producto útil, que conlleve a la solución de la problemática ambiental, que genere ingresos económicos y alternativas para su aprovechamiento (Cury et al., 2017).

2.2.1.2 Impacto ambiental de los residuos agroindustriales

Se estima que a nivel mundial se desecha aproximadamente una tercera parte de los alimentos para el consumo humano, generando residuos desde su cultivo hasta la comercialización (Ravindran et al., 2018). La constante generación de residuos, de acuerdo a cada país, depende de su ingreso promedio, producto interno bruto (PIB) y consumo antropogénico. Estos factores influyen directamente en la cantidad y tipo de consumo (Maza y Malavé, 2015b). A nivel mundial, países como México, Ecuador, Colombia, Paraguay, India y Panamá; son los principales generadores de residuos provenientes de la actividad agrícola, resultado de una gran actividad del sector económico (Gonzalez, Gómez, y Abad, 2017). Estos residuos al no ser procesados adecuadamente, son destinados a vertederos a cielo abierto produciendo altas concentraciones de dióxido de carbono, contaminación del agua o del aire, provocando una severa contaminación ambiental (Barragan, Tellez y, Laguna, 2008).

2.2.1.3 Producción de residuos agroindustriales a nivel mundial y nacional

De acuerdo con Badrán et al. (2019), la producción mundial de residuos agroindustriales es de gran amplitud. Aproximadamente, se generan 3,045 millones de toneladas por año. En México, se generan más de 70 millones de toneladas al año de biomasa residual agrícola, de los cuales corresponde un 79.4 % de residuos primarios, que son catalogados como los residuos provenientes de cereales como el trigo y maíz; residuos de hortalizas y frutas, como cáscaras y semillas; residuos de cosechas, como es el caso de forrajes o forestales. El 20.6 % corresponde a restos de cultivos industriales, como el bagazo de arroz, café, tabaco, y caña de azúcar (Vega et al., 2019).

2.3 Industria del café (*Coffea spp.*)

La industria cafetalera es una de las más importantes a nivel mundial puesto que la mayoría de los consumidores se centran principalmente en países desarrollados; por otra parte, cerca del 90 % de la producción del mismo se realiza en países en vías de desarrollo como gran parte de América Latina, en donde la industria del café constituye un gran rubro para la economía de los países productores (Hughes et al., 2014). No obstante, la agroindustria cafetalera se considera como una de las más contaminantes, pues la generación de gran cantidad de residuos desencadena grandes problemas ambientales, los cuales son necesarios contrarrestar (Maza y Malavé, 2015b).

Actualmente, el café es una de las principales bebidas en el mundo, constituyendo el segundo producto más comercializado después del petróleo, de esto radica la importancia para la economía mundial (Beelaerts et al., 2011). En el mundo se cultiva más de 10.2 millones de hectáreas de *Coffea arabica L.* y *Coffea canephora P.*, son cultivados por 25 millones de productores en 70 países, se estima que el 75 % de los cafetales son fincas familiares que se extienden desde menos de 1.0 hasta 10 hectáreas (Jáuregui et al., 2017).

El café (*Coffea spp.*) es considerado como uno de los principales cultivos industriales en México (Lopez et al., 2016). La producción de café en México es de suma importancia social, económica, ambiental y cultural, siendo considerada como una de las mayores fuentes de empleo rural (Jáuregui et al., 2017). Los principales productores de café en México se incluyen principalmente 12 estados; Veracruz, Puebla, Colima, Hidalgo, Nayarit, Oaxaca, Jalisco, Guerrero, San Luis Potosí, Querétaro, Tabasco y Chiapas, ocupando este último el primer lugar, con un aporte de 41 % de la producción total de café en México, seguido de Veracruz con un 24 %, Puebla con 15.3 %, Oaxaca el 10.0%, y el resto de los estados un 9.0% (Figuroa Hernández, Pérez Soto, y Godínez Montoya, 2015).

En Veracruz la región cafetalera, se encuentra distribuida en 842 comunidades y 82 municipios en donde comprenden cerca de 86 mil productores. Destacando 10 regiones productoras de café, en el norte del estado, Huayacocotla y Papantla; en la zona centro Aztlán, Misantla, Coatepec, Huatusco, Córdoba y Zongolica; en la zona sur del estado Tezonapa y Los Tuxtla; aportando 21.25% de la producción total de café cereza en México (Hermida, 2019). La superficie de cultivo en el estado es de 139 mil hectáreas de siembra destacando variedades de alta calidad de la especie *Coffea arabica: typica, bourbon, mundo novo, caturra y árnica*, entre otras (Sanchez y Nava, 2017).

2.3.1 Residuos agroindustriales del café

De la extensa industria cafetalera y como parte de su procesamiento, se pueden identificar diversos residuos biomásicos u orgánicos que se obtienen como desechos, los cuales son; la cascarilla de café, la boza y el mucílago. La boza es el primer subproducto que se obtiene del proceso del café, el cual procede del despulpado del grano de café. Como segundo subproducto, se encuentra el

mucílago, cuya característica principal es su gelatinosidad y su insolubilidad en agua. Finalmente y posterior al secado del grano de café, se obtiene la cascarilla del café; la cual proviene del despergaminado del café, en donde la cascarilla es removida mecánicamente del grano (Ramalakshmi y Raghavan, 2003). Los residuos, en base seca, que se obtienen del procesamiento del café corresponden en porcentaje a: la boza o pulpa (29 %), la cascarilla (12 %), y mucílago (4 %); el 55 % restante corresponde al grano del café (Murthy y Naidu, 2012).

2.3.2 Composición química y estructura del fruto de café

El café cereza es el fruto proveniente de la planta de café, perteneciente a la familia *Rubiaceae*. Los granos de café se producen a partir de la planta *Coffea L.*, existen más de 70 especies, sin embargo; solo dos especies de planta de café han sido estudiadas en el mundo y utilizadas para el consumo y comercialización, las cuales son: *Coffea arabica* (Arábica) y *Coffea canephora* (Robusta), estas representan un 75 % y un 25 % respectivamente, de la producción mundial de café (Mussatto et al., 2011; Janissen y Huynh, 2018). La composición química de cada una de estas, varía de acuerdo con la especie (Cuadro 1) (Belitz, Grosch, y Schieberle, 2009).

Cuadro 1. Composición química según la especie.

Componente	Arábica	Robusta
Carbohidratos solubles	9-12.5 %	6-11.5 %
Monosacáridos	0.2-0.5 %	0.2-0.5 %
Oligosacáridos	6-9 %	3-7 %
Polisacáridos	3-4 %	3-4 %
Polisacáridos insolubles	46-53 %	34-44 %
Hemicelulosa	5-10 %	3-4 %
Celulosa	41-43 %	32-40 %
Ácidos y Fenoles		
Ácidos volátiles	0.1 %	0.1 %
Ácidos alifáticos no volátiles	2-2.9 %	1.3-2.2 %
Ácido clorogénico	6.7-9.2 %	7.1-12.1 %
Lignina	1-3 %	1-3 %
Lípidos	15-18 %	8-12 %
Ceras	0.2-0.3 %	0.2-0.3 %
Aceites	7.7-17.7 %	7.7-17.7 %
Aminoácidos libres	0.2-0.8 %	0.2-0.8 %
Proteínas	8.5-12 %	8.5-12 %
Cafeína	0.8-1.4 %	1.7-4.0 %
Minerales	3-5.4 %	3-5.4 %

Recuperado de Belitz et al. (2009); Mussatto et al. (2011).

Estructuralmente, la cáscara o cascarilla del café constituye una fuente importante de celulosa y hemicelulosa, cuya función principal es darle resistencia a la pared celular. Por otro lado, la lignina que también forma parte de la pared celular, tiene la función de mantener las fibras de celulosa unidas (Basu, 2010). La celulosa es el compuesto más abundante en la cascarilla de café, ubicándose entre 24.5 % y 51 %, dependiendo de las condiciones de cosecha o de la variedad de café (Murthy y Naidu, 2012).

La cascarilla o también conocida como cisco, proviene del procesamiento de descascarado del café oro (grano seco). La cascarilla (Figura 1), es una capa gruesa de la cereza del café, representa cerca del 43 % de su peso en fruto (Arias y Meneses, 2016). Cerca de 0.180 toneladas de cascarilla se producen a partir de 1 tonelada de fruto de café. La cascarilla está compuesta por 15 % de humedad, 5.4 % de cenizas, 7.0 % de proteínas, 0.3 % de lípidos y 72.3 % de carbohidratos. La cascarilla de café contiene aproximadamente un 24.5 % de celulosa, 29.7 % de hemicelulosa, 23.7 % de lignina (Murthy y Naidu, 2012). Debido a la cantidad que representa en peso, es el residuo que aporta el mayor porcentaje de contaminación (Arias y Meneses, 2016).

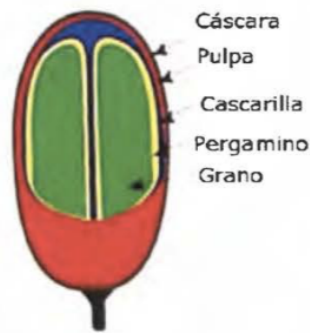


Figura 1. Estructura del grano de café. Fuente Murthy y Naidu (2012).

El café a nivel mundial, produce aproximadamente 0.5 % y 0.18 % toneladas de pulpa de café y cáscara, respectivamente (Mussatto et al., 2011). La pulpa de café es rica en carbohidratos, proteínas y minerales específicamente en potasio, de igual forma contiene cantidades significativas de taninos, polifenoles y cafeína (Cuadro 2) (Roussos et al., 1995). Dependiendo del tipo de procesamiento industrial, los primeros subproductos son la pulpa y la cáscara, representando el 29 y 12% del total de la cereza del café, en peso seco (Roussos et al., 1995; Janissen y Huynh, 2018).

Cuadro 2. Composición química del café cereza.

Componente	Pulpa	Cascara	Piel
Carbohidratos	40 – 50 %	57.8 %	44 %
Celulosa	63 %	43 %	17.9 %
Hemicelulosa	2.3 %	7 %	13.1 %
Humedad	81.4 %	12 %	59.0-10.3 %
Lípidos	2.5 %	1.5-2.0 %	2.2 %
Fibra total	18.0-21.0 %	31.9 %	62.4 %
Cenizas	8.9 %	6 %	4.7-7.0 %
Proteína	10.0-12.0 %	9.2 %	16.2-18.6 %
Nitrógeno	3.2 %	1.8 %	3 %
Caféina	1.25- 1.3 %	1.2 %	1.4 %
Tanina	1.8- 8.6 %	4.5- 9.3 %	0.02 %
Ácido Clorogénico	10.7 %	12.59 %	15.82 %

Recuperado de Janissen y Huynh (2018).

2.4 Industria de la caña de azúcar (*Saccharum spp.*)

La caña de azúcar (*Saccharum officinarum*), es el cultivo con mayor producción a nivel mundial. El área total de producción es de 19.24 millones de hectáreas de cultivo distribuidas en Asia (42.5 %), América (47.7 %), África (7.4%) y Oceanía (2.4 %) (Díaz, Portocarrero, Moreira, y Bustamante, 2002). Los principales productores de caña de azúcar a nivel mundial son Brasil (40 millones de toneladas (ton), India (32 millones ton); y México ocupa la séptima posición a nivel mundial (6.4 millones ton) (Olivares y García, 2019).

La industria azucarera en México es una de las más importantes, pues se distingue su gran desarrollo económico y social en el campo. Es cultivada por más de 164 mil productores, y se estima que la industria genera más de 440 mil empleos directos e indirectos (DOF, 2014). Esta industria se desarrolla principalmente en 15 entidades federativas y 227 municipios generando alrededor de 30 mil millones de pesos anualmente (Ramírez, 2017). El cultivo de caña es localizado en 173 municipios y 50.596 unidades de producción las cuales constituyen 25 zonas son destinadas para el abastecimiento cañero de ingenios azucareros y trapiches piloncilleros del estado de Veracruz, San Luis Potosí y Oaxaca (Aguilar Rivera, 2014; SIGVER, 2020). En el año 2012, se produjeron en México 46.23 millones de toneladas de caña de azúcar a nivel nacional. De la cual, 41.23 ton son bagazo de caña (Gibson, 2017).

La industria nacional de azúcar está conformada por 51 ingenios, distribuidos en 15 estados, de los cuales Veracruz cuenta con 18 (Pérez Sánchez, 2017), representando la entidad más importante en la agroindustria azucarera nacional junto con Jalisco, aportando un 50.6 % de la producción nacional (SIAP, 2018). En Veracruz, principalmente en la zona centro del estado, la producción de caña de azúcar y piloncillo representa la segunda actividad económica en generación de empleos. Sin embargo, es superada por la producción del café (Cortés, Díaz, Cabal, y Del Ángel, 2013; Aguilar Rivera, 2014). La caña de azúcar constituye el principal cultivo perenne y agroindustrial del estado, aportando el 39.7 % del total de la superficie cosechada, y entre un 37.8 al 39.6 % del azúcar producida a nivel nacional (Aguilar Rivera, 2014; CONADESUCA, 2019). A inicios del año 2021, se reportó una producción de azúcar de 100, 345 toneladas, de una producción nacional de 246,984 toneladas, posicionando al estado como el mayor productor (CONADESUCA, 2021).

2.4.1 Residuos agroindustriales de la caña de azúcar (*Saccharum* spp.)

La caña de azúcar se utiliza principalmente para producción de azúcar; se generan aproximadamente 250 kg de bagazo por cada tonelada de tallos, 30 kg de cachaza, 6 kg de cenizas, 45 kg de melaza (Cury et al., 2017). El bagazo de caña es el subproducto obtenido de la extracción del jugo de caña de azúcar, el cual en los ingenios se desecha o incinera. Tiene como características principales su bajo costo, además se puede aprovechar para la fabricación de papel o empaques (Gibson, 2017).

2.4.2 Composición química de la caña de azúcar

El bagazo tiene como característica ser una materia prima con gran cantidad de celulosa, contiene aproximadamente: 48.7 % de fibra, 2.3 % de sólidos solubles, 49 % de humedad, 45-55 % de celulosa, 18-24 % de lignina, 0.6-0.8 % de pectina y 1-4 % de cenizas (García Vargas, 2017b).

Existen seis especies *S. spontaneun*, *S. robustum*, *S. barberi*, *S. sinensi*, *S. edule* y *S. Officinarum*. Se caracterizan, principalmente, por su alta concentración de carbohidratos que fluctúa entre 75 y 92 % (Estrada et al., 2013).

La composición química de la caña de azúcar depende de varios factores en los que se incluye la edad, capacidad a tolerar enfermedades, condiciones de cultivo, y el uso de agroquímicos madurantes (Zossi, Cárdenas, Sorol, y Sastre, 2010). Es rica en carbohidratos y fuente energética,

aunque con contenido bajo de proteína, no superando el 5 % en materia seca (Lagos y Castro, 2019). En términos generales, la caña de azúcar está constituida por jugo y fibra, siendo esta última la parte insoluble en agua; constituida por celulosa, azúcares como glucosa (Dextrosa), entre otros (Cuadro 3) (Aguirre y Poveda, 2011).

Cuadro 3. Composición química de la caña de azúcar.

Componente químico	Porcentaje %
Tallos	
Agua	73-76
Sólidos	24-27
Sólidos solubles (Brix)	10-16
Fibra (Seca)	11-16
Jugo	
Azúcares	
-Sacarosa	75-92
-Glucosa	70-88
-Fructosa	2-4
Sales	
-Inorgánicas	3.0-3.4
-Orgánicas	1.5-4.5
Ácidos Orgánicos	1-3
Aminoácidos	1.5-5.5
Otros No Azucares	
-Proteína	0.5-0.6
-Almidones	0.001-0.050
-Gomas	0,3-0.6
-Ceras	0,15-0.50
-Compuestos Fenólicos	0,10-0.80
-Otros	3.0-5.0

Recuperado de Aguirre y Poveda (2011).

La fibra presente en la caña es una mezcla de celulosa, hemicelulosa y lignina, la cantidad varía de acuerdo con la variedad de caña, condiciones de cultivo y otros factores.

La gran producción de caña de azúcar únicamente se le atribuye un 24 % de valor comercial de materia seca acumulada en el procesamiento agrícola, el 76 % restante lo constituyen los residuos resultantes de la fabricación de azúcar o panela destacando cogollos, hojas y pajas, bagazo, melaza y cachaza. Los subproductos poseen gran cantidad de fibra, alto contenido de sacarosa y otros azúcares solubles y bajos en contenido de proteína y minerales (Cuadro 4) (Lagos y Castro, 2019).

Cuadro 4. Composición química y mineral de los subproductos de la caña de azúcar.

Componente %	Cogollo	Bagazo	Cachaza	Melote
Materia Seca	25	44.6	25.5	44.8
Humedad	75	55.4	74.4	55.2
Ceniza	6.4	2.3	3.4	10.7
Materia Orgánica	93.6	97.7	96.6	89.4
Proteína Cruda	4.9	2.2	9.9	11.1
Extracto Etéreo	0.7	0.4	7.6	4.9
Fibra Cruda	28.3	33.3	0.5	0.2
Fibra Detergente Neutro	68.2	71.8	-	-
Fibra Detergente Ácido	44.5	40.7	-	-
Hemicelulosa	23.7	31.1	-	-
Celulosa	40.3	34.1	-	-
Lignina	4.2	6.6	-	-
Nitrógeno	0.7	0.5	1.8	1.1
Fosforo	0.2	0.1	0.2	0.1
Potasio	2.1	1.9	1.8	0.5
Calcio	0.3	0.1	0.2	0.1
Magnesio	0.2	0.1	0.1	0.1
Sulfuro	0.2	0.1	0.2	0.1
Hierro	78.2	1241.3	1330.0	1078.9
Cobre	< 3	4.1	28.6	32.4
Manganeso	34.1	36.1	45.2	45.1
Zinc	26.0	11.0	93.5	59.0
Boro	1.6	1.9	2.1	4.5
Carbono	45.6	47,8	56.7	58.3

Recuperado de Lagos y Castro (2019).

2.5 Componentes principales de los residuales agroindustriales

2.5.1 Celulosa, hemicelulosa y lignina

Según Karimi, Shafiei, y Kumar (2013), la hemicelulosa y lignina son componentes importantes presentes en los residuos agroindustriales, estos en conjunto recubren la celulosa de las plantas. La celulosa fue descubierta en 1839 por el químico francés Anselme Payen (1795-1871), se obtuvo a partir de la madera para la producción de papel, la cual era más barata y abundante a diferencia del papel utilizado en esa época proveniente de algodón o lino (Wisniak, 2005).

La celulosa es un polisacárido estructural que forma parte de la biomasa lignocelulítica (McFarlane, Döring, y Persson, 2014). Como parte de la biomasa vegetal 36 moléculas de celulosa aproximadamente, son ensambladas formando fibras estructurales (nanofibrillas); empaquetándose

a su vez para la formación de unidades llamadas microfibrillas con un diámetro de 20 a 50 nm (Lavoine, Desloges, Dufresne, y Bras, 2012). Estas microfibrillas se orientan en una sola dirección, formando la pared celular vegetal (Siqueira, Bras, y Dufresne, 2010).

La hemicelulosa es un polímero heterogéneo de estructura lineal y ramificado; compuesto por azúcares y ácidos orgánicos. La lignina es un compuesto formado molecularmente por fenilpropano complejamente enlazados, la lignina es resistente a la degradación enzimática actuando como barrera física para la difusión de agua y caracterizada por aportar rigidez (Mussatto, Ballesteros, Martins, y Teixeira, 2012).

Al remover la hemicelulosa y la lignina se mejora la estabilidad y cristalinidad térmica de las fibras de celulosa, es por esto necesario un pretratamiento de despolimerización de los polisacáridos, para romper la hemicelulosa y lignina que rodea la celulosa, y modificar los enlaces de la matriz celular presente en los residuos agroindustriales liberándola (Tabil, Adapa, y Kashaninejad, 2011) (Figura 2). La extracción de celulosa es el tratamiento indicado para cambiar estructuralmente la biomasa lignocelulítica presente en los residuos agroindustriales, y obtener la celulosa libre de sus otros elementos (Johar, Ahmad, y Dufresne, 2012).

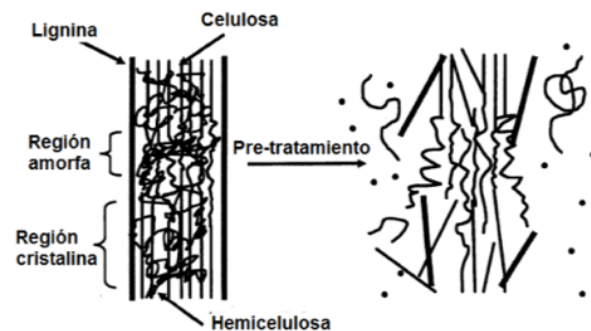


Figura 2. Pretratamiento en la matriz lignocelulítica. Fuente: Mosier et al. (2005).

2.5.2 Métodos de extracción

El método de extracción de celulosa usado generalmente en la industria de papel y pulpa, es considerado como un tratamiento que despolimeriza los subcompuestos de la celulosa y solubiliza

la lignina y hemicelulosa por medio de soluciones químicas; y posteriormente se somete a un blanqueo (Brinchi, Cotana, Fortunati, y Kenny, 2013).

Por medio de la extracción de celulosa, la matriz conformada por celulosa-hemicelulosa-lignina se logra romper en polímeros menores por medio de hidrólisis ácida o básica, dependiendo del contenido de lignina presente en la biomasa, de igual forma también depende el tratamiento químico utilizado teniendo diversos elementos estructurales en los componentes (Tabil et al., 2011). Según Karimi et al. (2013), la lignina se remueve mediante hidrólisis alcalinas, mientras que la hemicelulosa se solubiliza de manera más eficiente por medio de hidrólisis ácidas, removiendo el 100 % de la hemicelulosa. El blanqueamiento tiene la función de remover la lignina que no se eliminó en la hidrólisis alcalina, de esta forma se obtiene como producto final celulosa intacta (Chen, Lawton, Thompson, y Liu, 2012).

2.6 Plásticos o polímeros

El término plástico, proviene del griego Polys y Meros que significa “que puede ser modificado estructuralmente al ser sometido a calor” también son llamados comúnmente “polímeros” (Bejarano, 2018). Se forman a través de procesos de extrusión, hilado o modelado, que se caracterizan por su elasticidad y flexibilidad. Los plásticos están compuestos por grandes cadenas moleculares llamados polímeros que a su vez están formados por monómeros los cuales químicamente están compuestos por carbono e hidrógeno, algunos de estos son de origen sintético como el nylon, ó naturales, como la celulosa (Pérez, 2014).

2.7 Biopolímeros

En los últimos años, se ha adoptado la idea de convertir el desperdicio en riqueza, mediante el aprovechamiento de biomasa proveniente de residuos agrícolas, como; la fibra, la celulosa y el almidón. Esto, con la finalidad de reemplazar materiales petroquímicos usados para la producción de plásticos, convirtiéndose en una estrategia encaminada hacia la sostenibilidad. Estos biopolímeros o polímeros biodegradables, son aquellos que son fabricados a partir de biomasa (Azmin y Nor, 2020). Una diferencia significativa entre estos y los plásticos derivados del petróleo es, que los biopolímeros ahorran combustibles fósiles, disminuyendo de esta forma la emisión de dióxido de carbono y contaminación por plástico al medio ambiente (Abdul-Latif, Ong, Nomanbhay, Salman, y Show, 2020).

Algunas características importantes en los biopolímeros y que garanticen su óptima aplicación son la humedad, permeabilidad de vapor y solubilidad. La baja humedad en biopolímeros disminuye la posibilidad de proliferación microbiana y su rápida actividad metabólica, impidiendo su deterioro y cambios fisicoquímicos (Borah, Balasubramanian, Kaur, Kaur, Sukhija y Balasubramanian, 2019; Azmin y Nor, 2020). La solubilidad es la capacidad que tiene una sustancia determinada de disolverse en otra, se expresa como el porcentaje de disolución de la primera en la segunda sustancia (Chariguamán y Jimmy, 2015). Cabe destacar que depende de la aplicación del biopolímero, será conveniente un porcentaje alto o bajo de solubilidad (Morales, 2014; Flores y Del Carmen, 2016). Según Moreno Toasa (2015), no es necesario que las biopelículas sean permeables, favoreciendo la propiedad impermeable e insoluble de los plásticos.

La permeabilidad de vapor de agua es una cualidad importante en los materiales o películas elaboradas a base de biopolímeros, pues indica la propiedad de la película bioplástica de controlar el transporte de vapor de agua por unidad de área de un material liso y con un espesor dado. La permeabilidad se define como la difusividad aplicando las leyes de Fick y Henry (Santiago, 2015), impulsada por la diferencia de presión entre dos superficies específicas, bajo condiciones controladas de humedad y temperatura.

La rigidez presente en los polímeros se debe a fuerzas de cohesión que estabilizan a la matriz polimérica; el uso de plastificantes debilitan estas fuerzas de cohesión polimérica; mejorando su movilidad y flexibilidad (Alventosa Carbó, 2020). Algunos plastificantes empleados en la elaboración de biopolímeros tienen en su mayoría carácter hidrófilo como es el sorbitol o glicerol, y le atribuyen características elásticas y maleables a los biopolímeros, sin embargo; aumenta la capacidad de permeabilidad de vapor de agua. La incorporación de fibras hidrófobas pueden ser la solución a este problema. Generalmente, la permeabilidad de vapor de agua disminuye cuando incrementa la concentración de materiales hidrófobos; la adición de fibras de celulosa disminuye la permeabilidad de vapor de agua y mejora las propiedades mecánicas en los biopolímeros, puesto que la celulosa es de naturaleza hidrofóbica, insoluble en agua, cristalina debido al arreglo estructural de sus grupos hidroxilo (Mena-Martínez et al., 2019).

Existen varios tipos de biopolímeros destacando los derivados de celulosa, almidón, fibra, o proteínas, los cuales son los más conocidos. Los biopolímeros a base de almidón, son los más comunes en la industria, por su abundancia y bajo costo de producción. Sin embargo, el almidón no es un elemento termoplástico, por tal motivo se recurre a reforzarlo con algún tipo de material de relleno y mejorar las propiedades mecánicas y fisicoquímicas del biopolímero (Agustin, Ahmmad, Alonzo, y Patriana, 2014).

La problemática de la descomposición final de los residuos plásticos y su acumulación en el ambiente, han generado la necesidad de implementar medidas que reduzcan este problema. Los biopolímeros se caracterizan por el origen de su materia prima y por su biodegradabilidad (Niaounakis, 2013).

2.8 Biodegradabilidad

Los plásticos degradables están compuestos por macromoléculas, estos presentan cambios en su estructura química bajo ciertas condiciones del ambiente, perdiendo considerablemente sus propiedades físicas y químicas. Lo degradable, se refiere a la descomposición causada por cambios físicos o químicos. Los biopolímeros o plásticos biodegradables se caracterizan por su capacidad de biodegradarse en presencia de enzimas que son producidas por microorganismos o bacterias mediante mecanismos biológicos (Niaounakis, 2013).

Una característica elemental de los biopolímeros es su velocidad de degradación, la cual se lleva a cabo en un periodo relativamente corto, respecto a los polímeros sintéticos que tardan más de 500 años para su completa degradación. Inclusive, la biodegradación que estos plásticos prometen es simplemente descomponerse en fragmentos más pequeños (microplásticos) que se acumulan en los ecosistemas, provocando serios problemas a los organismos y el ecosistema (Segura, Noguez, y Espín, 2007).

Un polímero degradable es aquel que es susceptible de degradación por medios químicos o biológicos, empleando microorganismos (Galindo, 2016). La estructura química de los biopolímeros se diferencia de los convencionales debido a que la acción de los microorganismos puede destruirlos en ambientes biológicamente activos (Rodríguez Cuesta, 2012). De acuerdo con

Segura et al. (2007), estos se clasifican en; fotodegradables, semi-biodegradables, biodegradables sintéticos y completamente biodegradables naturales.

Los biopolímeros que nos interesan para fines de esta investigación son los completamente biodegradables naturales obtenidos de la biomasa extraída de residuos agroindustriales, tales como; la celulosa o fibra (Alventosa Carbó, 2020). Estos biopolímeros se caracterizan por que se degradan a partir de microorganismos hasta convertirse en CO₂, agua, metano y biomasa, en un periodo corto de tiempo (Rodríguez Cuesta, 2012).

De acuerdo con la Norma ASTM D6400-12 (Standard Specification For Labeling of Plastic Designed to be Aerobically Composted in Municipal or Industrial Facilities); los plásticos biodegradables son aquellos en los cuales la degradación es resultado directo de la acción natural de microorganismos, tales como; bacterias, algas y hongos (Galindo, 2016).

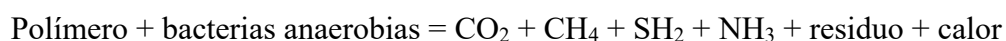
La biodegradación se puede dividir en dos tipos; la primaria, la cual es referida al tipo de degradación donde únicamente existen cambios estructurales del compuesto, es decir, se producen pocas alteraciones estructurales en la molécula original, lo que causa que ésta pierda sus propiedades físicoquímicas. Otro tipo de biodegradación es la mineralización o secundaria, en la cual el compuesto se convierte en productos inorgánicos de bajo peso molecular y constituyentes celulares, y la sustancia química es metabolizada por los microorganismos como fuente de carbono y energía. Este tipo de descomposición puede llevarse a cabo en presencia de oxígeno (aeróbica) o en su ausencia de él (anaeróbica) (Rodríguez Cuesta, 2012).

Lo que ocurre en el proceso de biodegradación en biopolímeros se describe siguiendo las siguientes reacciones dependiendo si ocurre en condiciones aerobias y anaerobias:

Reacción aerobia:



Reacción anaerobia:



Los factores del medio que intervienen directamente en el proceso de biodegradación son; pH, temperatura, humedad, así como; el peso molecular, tamaño del material, enlaces químicos susceptibles a hidrólisis, monómeros y aditivos del polímero (Rodríguez Cuesta, 2012).

La biodegradabilidad de los plásticos se evalúa desde dos aspectos: 1) Las características de las enzimas que producen los microorganismos relacionadas directamente con el tipo de microorganismo, condiciones de desarrollo y distribución; al igual que el pH, temperatura, humedad, oxígeno y nutrientes en el suelo; y 2) Las propiedades químicas y físicas del polímero, como el área superficial y condiciones hidrofílicas e hidrofóbicas (Mejía, 2017).

2.8.1 Etapas de biodegradación

Las etapas de biodegradación como ya se mencionó anteriormente, dependen de factores bióticos y abióticos del medio como; pH, temperatura, luz y presencia de microorganismos. Según Soriano Ortega (2020), la biodegradación polimérica consta de las siguientes fases:

1. Biodeterioro: consiste en una degradación superficial, modificando las características fisicoquímicas del material, acción realizada por los microorganismos fragmentando los biomateriales. El desarrollo de distintas especies microbianas aumenta el biodeterioro, facilitando la producción de moléculas más simples que actúan como fuente de carbono y de nitrógeno, o como factores de crecimiento para los microorganismos.
2. Despolimerización: En esta etapa los microorganismos comienzan a secretar agentes catalíticos, como enzimas o radicales libres con la finalidad de descomponer las moléculas poliméricas en monómeros u oligómeros reduciendo su peso molecular.
3. Asimilación: Ocurre cuando ciertas moléculas fragmentadas de los polímeros son reconocidas por las células microbianas logrando así atravesar la membrana plasmática. Las sustancias entran al citoplasma y se integran en el metabolismo microbiano para producir energía, biomasa, metabolitos primarios y secundarios al igual que vesículas de almacenamiento. Dentro de la célula, las moléculas transportadas se oxidan a partir de rutas catabólicas produciendo de esta forma adenosina trifosfato (ATP); así como otros elementos de la estructura celular. Esta etapa permite que los microorganismos crezcan y se reproduzcan mientras consumen substratos nutritivos procedentes del medio ambiente.
4. Mineralización: los metabolitos simples y complejos se mineralizan excretando compuestos como dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), agua (H₂O) o nitrógeno (N₂). Los

microorganismos son los que ejercen acción directa para degradar los biopolímeros.

La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OECD) desde el año 1977, se ha encargado de normalizar pruebas de biodegradación. Las cuales permiten la estimación de persistencia de distintas sustancias en condiciones ambientales (Vázquez Rodríguez y Beltrán Hernández, 2004).

Las pruebas de biodegradación se clasifican en tres; de campo, simulación y de laboratorio (Galindo, 2016).

2.8.2 Biodegradabilidad en condiciones de composta

Es un procedimiento basado en la descomposición microbiana, donde se obtiene un producto llamado humus, comúnmente conocido como composta. Las características químicas y físicas varían de acuerdo al material empleado para su elaboración, de las condiciones de evolución y el grado de descomposición adquirido, de ciertas propiedades del compost; como el color, el bajo contenido de carbono/nitrógeno y constante cambio de propiedades físicas debido a la actividad microbiana y capacidad de absorción en agua (Ruiz, Pastor, y Acevedo, 2013).

2.8.2.1 Vermicomposteo

El vermicomposteo es una técnica con fines eco-tecnológicos de bajo costo, el cual consiste en el proceso de bio-oxidación, degradación y estabilización de residuos orgánicos a partir de la acción realizada por lombrices, específicamente, la lombriz roja californiana *Eisenia Foetida*. Las cuales, se encargan de actuar como conductores en el proceso de fragmentación y acondicionamiento del sustrato para la actividad microbiológica. Los microorganismos degradan la materia orgánica, obteniendo como producto final un producto estabilizado y homogéneo que es empleado para diversas prácticas (Villegas Cornelio y Laines Canepa, 2017).

La diferencia entre la vermicomposta y el compost convencional, es la cantidad de micronutrientes y macronutrientes. La vermicomposta contiene altos niveles de nutrientes más solubles, como el; nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y magnesio. Estas propiedades mejoran significativamente la calidad del suelo haciéndolo más fértil, mejorando sus propiedades, físicas, químicas y biológicas a diferencia del compost tradicional (Ruiz et al., 2013; Lim, Wu, Lim, y Shak, 2015).

La tecnología del vermicompostaje se desarrolla a partir de la alimentación detrívora de especies de lombrices, las cuales se encargan de colonizar sustratos orgánicos (Mamani et al., 2012). La descomposición de los residuos orgánicos por lombrices es favorecida por los microorganismos endosimbiontes, los cuales producen enzimas extracelulares que degradan la celulosa y compuestos fenólicos, aumentando de esta forma la mineralización del carbono y nitrógeno del material que ingieren, a diferencia del compost tradicional (Villegas Cornelio y Laines Canepa, 2017). Así, las lombrices estabilizan los residuos orgánicos y producen como resultado el denominado humus de lombriz rico en nutrientes (Garg, Suthar, y Yadav, 2012).

Se ha demostrado que la biodegradación de los biopolímeros en el suelo aumenta con la adición de residuos de fermentación relacionados directamente con la biomasa del suelo, proporcionalmente ligada a los microorganismos asociados a la existencia de mayor fertilidad. Suponiendo que la fertilidad es un factor primordial en la biodegradación de los plásticos. La importancia del tipo de suelo durante el proceso de biodegradación del biopolímero obtenido, esta dada por su riqueza microbiológica, que favorecerá el proceso y la tasa de biodegradación del material (Adhikari et al., 2016; Soriano Ortega, 2020).

III. MARCO DE REFERENCIA

La presente investigación se realizó en el Instituto Tecnológico de Boca del Río, Ver. Ubicado en Carretera Veracruz-Córdoba Km. 12. Boca del Río, Ver. La recolección de muestras de cascarilla de café (*Coffea* spp.) se obtuvieron del Beneficio de café “Acatepec” ubicado en km 2.4 Carretera Colonia Manuel González, Huatusco Ver. Las muestras de bagazo de caña (*Saccharum* spp) se obtuvieron del Ingenio Grupo Azucarero San Pedro S.A. De. C.V., ubicado en Camino Vecinal Lerdo de Tejada, Saltabarranca, Ver. con 18 ° 36’ 36” latitud Norte y 95 ° 31’ 35” longitud Oeste (Figura 34).



Figura 3. Ubicación de los sitios de muestreo. Fuente: Google Maps.

3.1 Antecedentes

Agustin et al. (2014), obtuvieron biopolímeros hechos de almidón de maíz, los cuales fueron reforzados con cristales de celulosa extraídos de la paja de arroz. En un proceso previo, eliminaron la lignina y hemicelulosa por medio del método de hidrólisis ácida y básica; y obtuvieron nanocristales (NCC) de celulosa para la obtención de biopolímeros.

Shatkin, Wegner, Bilek, y Cowie (2014) reportaron la fabricación de materiales sostenibles con diversas aplicaciones de nanocristales de celulosa. Se ha empleado almidón de maíz nanoestructurado para la elaboración de una película biodegradable comestible, mejorando las propiedades físicas y mecánicas en ambientes altamente húmedos (Santiago, 2015).

El aprovechamiento de los residuos agroindustriales del sector azucarero ha permitido emplear la celulosa microcristalina del bagazo de la caña, para producir envolturas comestibles (Flores y Del Carmen, 2016). Así también, se han caracterizado materiales celulósicos a base de maíz, cascarilla de arroz, cacao y café, y su incorporación a películas de almidón mejorando sus propiedades funcionales como materiales para el envasado de alimentos (Ortega Toro, 2017; Postigo, 2019; Azmin y Nor, 2020). Los métodos de extracción de este compuesto, es la hidrólisis ácida con ácido sulfúrico y básica con hidróxido de sodio, obteniendo un resultado favorable y con mayores rendimientos por el método químico de hidrólisis (García et al., 2017).

3.2 Frontera del conocimiento

En 2016, a fin de caracterizar los residuos agroindustriales para su aprovechamiento, se evaluaron las potencialidades del uso de cáscara de coco y bagazo de caña de azúcar para la obtención de productos químicos con alto valor agregado como compuestos fenólicos que sustituyen a los derivados del petróleo y para la obtención de biocombustibles y síntesis de compuestos químicos (Cabrera et al., 2016).

La utilización del bagazo de la caña de azúcar para la obtención de celulosa microcristalina (MCC); se ha implementado en la fabricación de películas comestibles (Flores y Del Carmen, 2016). La producción de bioproductos por medio de la biorrefinería de residuos agroindustriales como la

pulpa celulítica, representa una alternativa en la industria de los compuestos de almidones termoplásticos.

Los biopolímeros producidos a partir del almidón residual proveniente de peladoras de papa presentan un nivel alto de biodegradabilidad (Meza, 2016).

Para Gonzalez et al. (2017), en su artículo de investigación relacionaron las principales fuentes de residuos en Colombia, en donde se determinaron algunas alternativas para el aprovechamiento de los subproductos agrícolas, determinando las características y propiedades para la obtención de nuevos materiales dándoles otra utilidad, con la finalidad de establecer el desarrollo de productos adecuados que cumplan con las características de implementación en el mercado mundial y que sean regidos por las adecuadas normativas de calidad.

García Vargas (2017) empleó bagazo de caña y caucho natural como un posible sustituto del plástico. La valorización, impacto, y manejo de residuos agroindustriales, han generado alternativas tecnológicas destinadas para su aprovechamiento (Cury et al., 2017; Gañán et al., 2017; Corredor y Pérez, 2018; Para Suárez, 2018).

El estudio de los materiales provenientes de recursos naturales renovables, como la quitina, celulosa y el almidón; muestra el avance tecnológico en el desarrollo nuevos biopolímeros (Ayala y Sanabria, 2018). Los cuales, además, se han combinado con otros, como el almidón extraído de las semillas de aguacate y glicerol, obteniendo mejoras en las condiciones de tracción y elongación (Sartika, Lubis, Harahp, Afrida, y Ginting, 2018). Por ejemplo, formulaciones a partir de residuos de café y maíz han sido utilizados en la producción de bolsas biodegradables (Toala y Sarmiento, 2019a), ó cascara de cacao para la producción de pulpa de papel (Torres, 2019). Estas propiedades y beneficios, son algunas de las ventajas de los biopolímeros ante los plásticos convencionales (Riera y Palma, 2018; Rimac, 2019).

IV. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

La industrialización y la urbanización son las principales problemáticas a nivel mundial, pues afectan directamente a la biodiversidad. El desarrollo industrial y agrícola en las últimas décadas; ha generado un significativo crecimiento poblacional haciendo necesario el abastecimiento de alimentos y con esto el aumento de desechos sólidos que causan contaminación ambiental (Castellanos, 2013).

La producción mundial de residuos agroindustriales genera 3,045 millones de toneladas por año (Badrán et al., 2019); se estima que los desechos generados mundialmente representan una tercera parte de los alimentos destinados para el consumo humano; ya que el proceso de producción considera desde el cultivo hasta la comercialización, en las cuales se generan desechos agroindustriales. Esta cifra depende directamente del PIB de cada país, es decir, del ingreso promedio y del consumo poblacional de cada región. Los principales países generadores de residuos agroindustriales en el mundo son; México, Ecuador, Colombia, Paraguay, India y Panamá (Gonzalez et al., 2017).

Los residuos generados en los países en vías de desarrollo no poseen un adecuado proceso para su eliminación, por lo tanto son destinados a vertederos, provocando una severa formación de CO₂, contaminación de mantos acuíferos, contaminación al ambiente cuando son incinerados inadecuadamente (Blanca et al., 2008). México, genera aproximadamente 70 millones de toneladas al año de residuos agroindustriales (Vega et al., 2019); el inadecuado manejo de estos residuos origina una problemática que actualmente es considerada un desafío ambiental (Ojeda, 2019).

La extensa generación de biomasa proveniente de la actividad agrícola, no tienen un fin reutilizable; los residuos agroindustriales suelen descomponerse en ambientes naturales o solo se acumulan en vertederos, desencadenando graves problemas ambientales por la materia orgánica acumulada (Toala y Sarmiento, 2019b). La formación de residuos agroindustriales inicia por el proceso natural de la fotosíntesis, aproximadamente se fijan 220 millones de toneladas de biomasa, de aquí que la celulosa sea el compuesto más abundante en la tierra, presente en la mayoría de los residuos agroindustriales.

El sector cafetalero es considerado uno de los más contaminantes, durante el procesamiento de 547.000 toneladas de café en América Central se generó 1.1 millones de toneladas de celulosa, impactando negativamente al planeta (Maza y Malavé, 2015a); al igual que la industria azucarera debido al inadecuado manejo de sus residuos (Ayala y Sanabria, 2018). Los residuos generados en procesos del sector industrial podrían ser aprovechados para la obtención de nuevos productos con valor agregado (González, 2013); mediante la implementación de políticas gubernamentales para el desarrollo de biotecnologías y creación de nuevos materiales.

Los productos plásticos tardan en promedio entre 150 y 500 años para alcanzar su completa degradación; la forma de degradación depende del material y el entorno (Navarro et al., 2019). La mayoría de los productos plásticos provienen de compuestos derivados del petróleo, aunado al elevado costo del petróleo crudo además de ser un recurso no renovable (Quiñonez, 2015). Además, no existe un manejo adecuado para su reciclaje, lo cual representa grandes costos (Barrera, 2015).

La falta de intervención gubernamental y la falta de políticas y programas dirigidos a las industrias productoras de plástico para el envasado de alimentos, impide modificar los dogmas socioculturales ante la problemática (Castellanos, 2013); además de la falta de innovación y producción de nuevos plásticos biodegradables o biopolímeros de origen biológico (Ballesteros Paz, 2014). Según Riera y Palma (2018), la industria productora de biopolímeros representa únicamente el 1 % de 320 millones de toneladas de plástico producido anualmente.

4.1 Pregunta de investigación

¿Cuáles son las características fisicoquímicas de los residuos agroindustriales del café (*Coffea* spp.) y de la caña de azúcar (*Saccharum* spp.) requeridas para la formulación de biopolímeros?

4.2 Justificación

La obtención de biopolímeros a partir de celulosa, es una alternativa para el aprovechamiento de los residuos agroindustriales y reducción del impacto ambiental generado por la contaminación derivada del uso excesivo de plásticos derivados del petróleo. Se generan, aproximadamente, 3,045 millones de toneladas de residuos agroindustriales por año (Badrán et al., 2019), y en la mayoría de los casos son considerados como basura o incluso son destinados a la combustión, provocando daños al medio ambiente.

Los residuos agroindustriales del café y de la caña de azúcar contienen celulosa, su extracción y aprovechamiento son una estrategia rentable orientada en la sustentabilidad, lo cual encaminaría el desarrollo social y económico de la agroindustria, al procesar adecuadamente estos desechos no aprovechados (Maldonado, 2015). México se encuentra incursionando en esta industria del biopolímero, es limitada la cantidad de empresas dedicadas a la producción plásticos basados en biopolímeros. Veracruz es uno de los principales estados productores de café (*Coffea* spp.) y caña de azúcar (*Saccharum* spp); industrias que generan grandes cantidades de residuos agroindustriales durante su producción. La elaboración de biopolímeros a partir de estos residuos, puede dar valor agregado a nuevos productos biodegradables, y beneficios económicos, por el aprovechamiento de sus residuos como materia prima (Morales, 2018). Además, es una alternativa que contribuye en la disminución del consumo de plásticos de un solo uso, producidos con derivados del petróleo (Cardoso, Green, Trespacios, Paz, y Arelle, 2016). El volumen de plástico producido a nivel mundial es de 83,000 millones de toneladas, de las cuales solo el 21 % tiene una adecuada disposición final. México, ocupa el décimo segundo lugar a nivel mundial, en consumo de plástico (Pérez, 2014). Y cerca de 525 billones de microplásticos se encuentran en el fondo marino (Eriksen et al., 2014).

V. HIPÓTESIS

5.1 Hipótesis general

Las características físicoquímicas de los residuos agroindustriales del café (*Coffea spp.*) y caña de azúcar (*Saccharum spp.*) son las mínimas requeridas para la formulación de biopolímeros.

VI. OBJETIVOS

6.1 Objetivo General

Evaluar la calidad físicoquímica a los residuos agroindustriales del café (*Coffea spp.*) y caña de azúcar (*Saccharum spp.*) para la formulación de biopolímeros.

6.1.1 Objetivos Particulares

1. Determinar las características físicoquímicas de la celulosa extraída de los residuos agroindustriales del café (*Coffea spp.*) y caña de azúcar (*Saccharum spp.*).
2. Formular la composición del biopolímero a partir de la celulosa y fibra extraída de los residuos agroindustriales del café (*Coffea spp.*) y caña de azúcar (*Saccharum spp.*).
3. Determinar la biodegradabilidad de los biopolímeros formulados a nivel laboratorio en condiciones de composta.

VII. MATERIALES Y MÉTODOS

Esta investigación se realizó en el laboratorio LIRA (Laboratorio de Investigación en Recursos Acuáticos) del Instituto Tecnológico de Boca del Río.

7.1 Caracterización de la materia prima (*Coffea* spp.)

Para determinar las características físicoquímicas de la celulosa extraída de los residuos agroindustriales del café (*Coffea* spp.) y caña de azúcar (*Saccharum* spp.), se realizó:

7.1.1 Extracción de celulosa y fibra

La extracción de celulosa del bagazo de caña de azúcar (*Saccharum* spp.) y de la cascarilla de café (*Coffea* spp.); se realizó por el método propuesto por Cazaurang, Peraza, y Cruz (1990) y Ortega Toro (2017) para la extracción de celulosa; así como para la extracción de fibra de acuerdo a lo propuesto por Beninia, Voorwald, y Cioffi (2011) y Azmin y Nor (2020), con algunas modificaciones. Se extrajo la celulosa y fibra de acuerdo con las siguientes etapas:

7.2 Pretratamiento general determinación de humedad por el método gravimétrico AOAC (925.10)

Se determinó la humedad presente en los residuos después del lavado y secado por medio del método gravimétrico AOAC 925.10 (INTERNATIONAL, 1990). Dicho método consiste colocar en una mufla un crisol acondicionado a peso constante (H_1), con una porción de muestra fresca y someterlos a secado al horno (H_2), dejando enfriar en un desecador y determinar su peso, posteriormente se lleva al horno por 1 hora más hasta que dos pesadas sucesivas no excedan de 5 mg (H_3). Para determinar el porcentaje de humedad de las muestras se aplica la siguiente ecuación 1.

$$\% \text{ humedad} : \frac{H_2 - H_3}{H_2 - H_1} * 100 \quad (1)$$

Donde:

H_1 = peso del crisol vacío (g)

H_2 = peso del crisol más muestra (g)

H_3 = peso de la muestra desecada (g)

Las muestras se sometieron a un triturado fino uniforme con un medio de trituración convencional, se tamizaron los residuos utilizando tamices de 900 y 2000 micras y haciendo uso de un agitador Ro Tap, con la finalidad de aumentar la superficie de contacto que tendrá la materia prima con los reactivos a utilizar; tal como se muestra en el **Anexo 1**.

7.2.1 Determinación porcentual de celulosa

Es importante determinar la existencia de celulosa presente en los residuos o materia prima previa a la extracción por hidrólisis y obtener la celulosa de ambos residuos; se realizó a partir de una técnica sencilla de laboratorio empleando el método modificado de Licitra, Hernandez, y Van Soest (1996).

Se llevó a reflujo una porción de las muestras pre-tratadas junto con ácido acético concentrado ($C_2H_4O_2$) y ácido nítrico (HNO_3), posteriormente se filtraron y neutralizaron las muestras; finalmente se enjuagaron con etanol y fueron llevadas a un secado dentro de un crisol a peso constante (material A) dentro de un horno de secado; seguido de eso, se incineró el residuo obtenido (material B); finalmente el residuo fue pesado. La determinación del porcentaje de celulosa se calcula mediante la ecuación (2):

$$\% \text{ Celulosa: } \frac{(\text{material A}) - (\text{material B})}{\text{Peso de la muestra utilizada}} * 100 \quad (2)$$

Donde:

Material A = Crisol a peso constante

Material B = Residuo incinerado

7.3 Extracción de celulosa

Se sometió la materia prima a una hidrólisis alcalina, posteriormente se realizó un blanqueamiento y por último se sometió a una hidrólisis ácida; tales procesos químicos fueron adaptados a los residuos de café y de caña de azúcar para la extracción de celulosa con ciertas modificaciones para ambos residuos. Durante esta etapa, se evaluaron las características de la celulosa obtenida en los residuos de cascarilla de café y bagazo de caña de azúcar, se determinaron parámetros específicos como la humedad, por el método gravimétrico estipulado por la técnica AOAC (925.10); el contenido de cenizas presentes en la celulosa extraída por medio del método AOAC 923.03, y el

contenido de alfa celulosa con la NORMA TAPPI T (203 m-58). De esta forma se identifica que la celulosa obtenida cumpla con las características necesarias para el desarrollo de la siguiente etapa experimental.

7.3.1 Extracción de celulosa para cascarilla de café (*Coffea* spp.)

El tratamiento experimental para la cascarilla de café se desarrolló por medio de hidrólisis alcalina propuesto por Cazaurang et al. (1990) con algunas modificaciones, sometiendo los residuos a un tratamiento con hidróxido de sodio en lapsos de 60 minutos sobre una placa térmica con agitación constante, y dejando reposar las muestra para posteriormente someterlas a enjuague y filtrado al vacío, de esta forma se eliminó cualquier residuo de la solución alcalina, removiendo las sustancias solubles en la solución álcali, hasta alcanzar un pH neutro en la muestra obtenida.

Durante este tratamiento de hidrólisis alcalina se reduce el tamaño de la fibra de celulosa, despolimerizando la estructura celulósica formando polímeros menores (Tabil et al., 2011), eliminando en este tratamiento la lignina, pectinas e impurezas presentes en los residuos.

Posteriormente las muestras obtenidas fueron llevadas a un blanqueo siguiendo el método empleado por Ortega Toro (2017), utilizando hipoclorito de sodio (NaCl_2) en una placa térmica con agitación continua; posteriormente se lavaron y filtraron al vacío las muestras obtenidas. Se repitió el proceso aproximadamente cuatro veces o hasta obtener un color completamente blanco en la muestra. Finalmente se lavaron las muestras con agua destilada hasta obtener un pH neutro y se llevaron a secado por 90 minutos a 60 °C; según Ortega Toro (2017) en este proceso de blanqueo se elimina la lignina aún presente en la materia destruyendo el anillo aromático de la lignina y en teoría es la razón característica de tornarse de color blanco.

El último tratamiento químico para el residuo de cascarilla de café fue someter consecutivamente la muestra obtenida en el tratamiento de blanqueo a una hidrólisis ácida, siguiendo el método propuesto por Sung, Chang, y Han (2017) con algunas modificaciones, el cual consistió en utilizar ácido sulfúrico (H_2SO_4) concentrado con agitación constante en una placa térmica con agitación; se enjuagó con agua destilada para detener la reacción de hidrólisis y alcanzar un pH neutro, fueron llevarlas a secado a 60 °C por 100 minutos. En el tratamiento ácido se rompen los enlaces glucosídicos de las cadenas de celulosa, removiendo la hemicelulosa en su totalidad; como

resultado final se obtiene celulosa pura (Ortega Toro, 2017). Cada una de las técnicas descritas anteriormente se ilustran en el **Anexo 1**.

7.3.2 Extracción de celulosa para bagazo de caña de azúcar (*Saccharum spp.*)

El tratamiento de extracción de celulosa específico para el bagazo de caña de azúcar es similar, la única diferencia al descrito para la cascarilla de café, es que el bagazo se somete dos veces a hidrólisis alcalina y dos veces a blanqueo, debido a las características de este residuo que es estructuralmente más fibroso y más resistente a la despolimerización de las paredes de celulosa a diferencia de la cascarilla de café. El método para los tratamientos del residuo son los propuestos por Cazaurang et al. (1990), con algunas modificaciones, el cual consiste en primera instancia en someter las muestras de bagazo pre tratado al tratamiento alcalino por hidrólisis, empleando hidróxido de sodio (NaOH) en una placa térmica con agitación continua, posteriormente se enjuaga hasta obtener un pH neutro para finalmente someterlo a un secado a 65 °C por 90 minutos y dejarlo reposar por 12 horas.

El siguiente tratamiento es la hidrólisis ácida la cual consiste en someter las muestras pre-tratadas a una solución de ácido sulfúrico (H₂SO₄) con agitación continua; se procedió a detener la reacción, se dejó enfriar la muestra y fue lavada con agua destilada hasta alcanzar un pH neutro (Cazaurang et al., 1990).

Posterior al tratamiento ácido se continuó con el tratamiento por blanqueo descrito por Cazaurang et al. (1990), en donde se somete el residuo obtenido a un blanqueo con hipoclorito de sodio (NaClO₂) con agitación constante en una placa magnética durante 60 minutos, transcurrido el tiempo se lava la muestra hasta obtener un pH neutro.

Seguido del blanqueo de nuevo se realiza la extracción alcalina con agitación continua por 1 hora para reducir más el tamaño de la fibra de celulosa, y despolimerizarla, formando polímeros menores y eliminando la lignina, pectinas e impurezas presentes en el bagazo que no se eliminaron en la primera hidrólisis (Tabil et al., 2011).

Finalmente se somete al último blanqueo para eliminar la lignina aún presente en la muestra de bagazo, seguido de un lavado con agua destilada hasta alcanzar el pH neutro, se llevó a secar la celulosa por 24 horas a 65°C; el procedimiento descrito anteriormente se ilustra en el **Anexo 1**.

7.3.3 Rendimiento

Rendimiento de celulosa (%), se refiere al porcentaje de celulosa recuperada después del tratamiento, para su cálculo se utilizó la ecuación (3):

$$\text{Rendimiento celulosa \%} = \frac{C}{Z} * 100 \quad (3)$$

Donde:

C = Es la cantidad de celulosa extraída (g)

Z = 25 g de paja pre-tratada

7.4 Caracterización de la celulosa obtenida de bagazo y cascarilla

Posteriormente ya extraída la celulosa se determinaron ciertas características presentes en la celulosa, tales como el contenido de humedad por el método gravimétrico AOAC (925.10), determinación del contenido de cenizas por el método AOAC 923.03, el contenido de alfa celulosa (NORMA TAPPI T 203 m-58).

7.4.1 Determinación de humedad método gravimétrico AOAC (925.10)

Se determinó la humedad presente en la celulosa extraída por el método gravimétrico AOAC (925.10) descrita anteriormente la cual consiste en pesar un crisol de porcelana acondicionado a peso constante (H_1), pesando una porción de muestra de celulosa en el crisol, colocando en un horno de secado (H_2), dejando enfriar en un desecador; pesar y llevar nuevamente al horno por 1 hora, hasta no tener variación de peso (H_3). Haciendo uso de la ecuación (4).

$$\% \text{ humedad} = \frac{H_2 - H_3}{H_2 - H_1} * 100 \quad (4)$$

Donde:

H_1 = peso del crisol vacío (g)

H_2 = peso del crisol más muestra (g)

H_3 = peso de la muestra desecada (g)

7.4.2 Determinación de cenizas método AOAC 923.03.

Este método se realizó con la finalidad de determinar la cantidad de minerales presentes en la celulosa previamente extraída de la cascarilla de café y del bagazo de caña de azúcar, posterior a los procesos químicos realizados (Flores y Del Carmen, 2016); se determinaron a partir del método gravimétrico AOAC 923.03, el cual consiste en colocar una porción de celulosa en crisoles de porcelana (P_i) previamente acondicionados a peso constante; se llevaron las muestras a carbonizar en una mufla, consecutivamente se calcinaron durante 3 horas, dejando como resultado cenizas blancas. Se dejaron enfriar los crisoles a temperatura ambiente; se pesaron y registraron como peso final (P_f) y se utilizó la ecuación (5) para determinar el porcentaje de cenizas.

$$\% \text{ Cenizas: } \frac{P_f}{P_i} * 100 \quad (5)$$

Donde:

P_f = Peso final muestra calcinada

P_i = Peso inicial muestra fresca

7.4.3 Contenido de alfa celulosa (NORMA TAPPI T 203 m-58)

El método TAPPI T 203 m-58 permite conocer de forma experimental el grado de pureza de la celulosa extraída de ambos residuos a partir de la determinación del contenido de alfa celulosa (Flores y Del Carmen, 2016). Este elemento se refiere a la celulosa microcristalina despolimerizada y purificada, correspondiente a la fracción sólida de bajo peso molecular, resistente a la hidrólisis ácida; que resulta como producto final un polvo blanco, fino, con alto grado de pureza, inodoro, libre de contaminantes orgánicos e inorgánicos; insoluble en agua, solventes orgánicos y ácidos diluidos, pero soluble de forma parcial en soluciones álcalis (García et al., 2013). La técnica describe el procedimiento en donde se colocó una cantidad de celulosa extraída en un vaso de precipitados sobre una parrilla magnética, agregando una solución alcalina con hidróxido de sodio (NaOH) con agitación continua durante 1 minuto; consecuentemente se agregaron 4 porciones de la misma solución durante 2, 8 y 10 minutos, seguido se diluyó la mezcla con agua destilada y agitación continua; el contenido del vaso se filtró al vacío hasta asegurar que no existieran finos en suspensión, el residuo se lavó por succión con agua destilada y luego con ácido acético, dejando reposar por 5 minutos con esta solución; se eliminó el ácido acético en su totalidad con agua

destilada, la muestra se sometió a un secado a la estufa hasta obtener peso constante finalmente los resultados se calcularon como porcentaje sobre pulpa seca a la estufa.

La ecuación (6) se utilizó para obtener el contenido de alfa celulosa de las pulpas:

$$\text{Contenido de celulosa \%} = \frac{W_2}{W_1} * 100 \quad (6)$$

Donde:

W1 = Peso de la pulpa seca a la estufa (g)

W2 = Peso del residuo de la extracción seca a la estufa (g)

7.5 Método de extracción de fibra para bagazo

El desarrollo de este método se basó en el desarrollado por Beninia et al. (2011) y Azmin y Nor (2020) con algunas modificaciones, haciendo uso de una solución de (NaOH) concentración 1 mol, con agitación continua en una placa magnética, para su posterior lavado y filtrado hasta neutralizar, posteriormente se secó en horno durante 24 h. Se sometieron las muestras a un blanqueo utilizando una solución de ácido acético y (NaCl), sobre una placa caliente y agitación magnética, se procedió al filtrado y lavado hasta obtener un pH neutro tal como se muestra en el **Anexo 1**; finalmente la fibra obtenida fue secada en un horno a 50 ° C durante 24 h.

7.6 Elaboración del biopolímero

Una vez realizados cada uno de los tratamientos químicos descritos anteriormente se procedió a elaboración del biopolímero hecho a base de celulosa y fibra previamente extraídas de la cascarilla de café y del bagazo de caña de azúcar respectivamente, la razón principal de la mezcla de fibra y celulosa es que según la literatura, esta combinación en la formulación de biopolímeros, mejora las propiedades fisicoquímicas de los mismos Azmin y Nor (2020), considerando que ambos residuos contienen cantidades considerables de celulosa y fibra en su composición tal como se mostró anteriormente. Para la elaboración del biopolímero por apariencia y facilidad de manejo se optó por utilizar la celulosa de cascarilla de café puesto que la celulosa de bagazo de caña de azúcar es de apariencia fibrosa y difícil de manipular para la elaboración de biopolímeros, además que se presentó mejor rendimiento, mejores valores en cuanto a la caracterización fisicoquímica en la celulosa de cascarilla de café que, en el bagazo de caña de azúcar, esto se discutirá posteriormente.

Se realizaron varias pruebas con diversos porcentajes, sin embargo, las demás composiciones se descartaron, debido a la fragilidad en su estructura, por lo que se realizó una mezcla homogénea, iniciando con la elaboración de un biopolímero hecho a base de celulosa pura de cascarilla de café siendo el (tratamiento A), seguido de la formulación el biopolímero de 25 % de celulosa y 75 % de fibra de bagazo siendo el (tratamiento B). Cada biopolímero se realizó siguiendo lo descrito por Beninia et al. (2011) y Azmin y Nor (2020) con algunas modificaciones para cada formulación distinta, utilizando celulosa, fibra o la combinación de ambas, y utilizando reactivos plastificantes para lograr el desarrollo del biopolímero.

El peso total para cada proporción fue de 1,5 g, con diferentes proporciones de fibra y celulosa (Cuadro 5).

Cuadro 5. Formulación de los biopolímeros

Biopolímero A	Biopolímero B
100 % Celulosa de cascarilla de café (1.5 g)	75% Fibra de bagazo (1.125) g 25 % Celulosa cascarilla de café (0.375 g)

Se prepararon 1,5 g de materia prima, con 1 ml de glicerol, 40 ml de agua destilada y 0,5 g de sorbitol, se mezclaron todos los ingredientes con agua destilada en relación 1:10 y se agitaron en la placa caliente hasta que el agua se evaporara y la solución se volviera pegajosa.

Se vertió la mezcla en una placa Petri de vidrio para producir un plástico. Se secó la película de biopolímero en el horno durante 4 horas a 50 ° C y luego se mantuvo a temperatura ambiente durante tres días aproximadamente para alcanzar el peso constante.

7.6.1 Caracterización de los biopolímeros

Una vez desarrollados los biopolímeros se procedió a analizar ciertas características presentes en los dos mejores biopolímeros los cuales fueron el de 100 % celulosa de cascarilla de café (tratamiento A) y 75 % fibra de bagazo y 25 % celulosa (tratamiento B), los parámetros determinados fueron; espesor haciendo uso de un micrómetro, se determinó la humedad presente en el biopolímero, la permeabilidad al vapor de agua por el método gravimétrico establecido por ASTM E96-80-00, y solubilidad en agua, cada procedimiento se describe a continuación.

7.6.2 Espesor

Se utilizó un micrómetro digital vernier de la marca precise, con rango de 0-6"/0-150 mm, resolución de 0.1 mm.

7.6.3 Humedad

Se determinó el porcentaje de humedad basado en lo propuesto por Azmin y Nor (2020), el cual consistió en determinar gravimétricamente el peso del biopolímero utilizando la siguiente ecuación (7).

$$\% \text{ humedad: } \frac{(w-d)}{w} * 100 \quad (7)$$

Donde:

w = Es el peso inicial del biopolímero

d = Es el peso final o el peso seco constante del biopolímero.

7.6.4 Permeabilidad al vapor de agua

Se determinó esta prueba por medio del método gravimétrico modificado de la norma ASTM E96-80-00, en el cual se cuantifica la facilidad con la que el vapor de agua puede traspasar en las películas (Abarca Flores, 2012; Flores y Del Carmen, 2016). Se determinó la permeabilidad al vapor de agua, se cortaron los biopolímeros en forma circular, introducidos en vasos volumétricos (adaptados), con agua destilada; se colocaron los vasos a 25 °C en un desecador con un agente desecante. El peso se determinó cada 24 h por 9 días con balanza analítica (Chariguamán, 2015). El grado de transmisión al vapor de agua (Tva) se calculó según la ecuación (8):

$$Tva: \frac{\Delta m}{tA} \quad (8)$$

Donde:

TVA = grado de transmisión de vapor de agua, en $\text{gm}^{-2} \text{h}^{-1}$

Δm = cambio de masa ocurrido en el tiempo en g

T = tiempo entre lecturas, en h

A = Área de ensayo de la muestra, en m^2

Considerar la fuerza motriz para la transmisión de vapor de agua, que en este caso es la diferencia de presión entre el interior de la copa (HR: 100%) y el exterior (HR: 60%), medido en kPa.

La permeabilidad al vapor de agua (Pva) se calculó a partir de la ecuación (9):

$$Pva: \frac{\Delta m \cdot \varepsilon}{t \cdot A \cdot \Delta P} \quad (9)$$

Donde:

PVA ε = Permeabilidad al vapor de agua, (mm·g·kPa⁻¹·m⁻²·h⁻²)

Δm = Cambio de masa ocurrido en el tiempo, (g)

t = Tiempo entre lecturas, (h)

A = Área de ensayo de la muestra, (m²)

ε = Espesor de la película, (mm)

Δp = S(R1-R2)

S = presión de saturación de agua a la temperatura del ensayo, (kPa)

R1 = Humedad relativa, %, de la parte con mayor presión de vapor.

R2 = Humedad relativa, %, de la parte con menor presión de vapor.

La permeabilidad al vapor de agua (Pva). Es la cantidad de vapor de agua que pasa por unidad de superficie de un material de espesura conocida, que es inducida por una diferencia de presiones entre dos superficies específicas, con condiciones de temperatura y humedad relativa específica ASTM E96-80.

7.6.5 Solubilidad en agua

Este análisis consistió en determinar el porcentaje soluble en agua siguiendo el método empleado por Flores y Del Carmen (2016), el cual consistió en sumergir la película de biopolímero en agua destilada a temperatura ambiente, dejarlo por 24 horas sin agitación; se filtró el material no soluble y se secó. El peso seco inicial y final de las muestras se obtuvo después de secar en una estufa durante 24 h. Se calcula la solubilidad en agua (%) utilizando la siguiente fórmula:

$$\% \text{ de solubilidad en agua: } \frac{P_i - P_f}{P_i} * 100 \quad (10)$$

Pi = peso seco inicial de la muestra (g).

Pf = peso seco final de la muestra (g).

7.6.6 Caracterización de las laminas de biopolímero

Se caracterizaron las láminas con la finalidad de determinar los parámetros para la prueba de biodegradación; se determinaron parámetros por triplicado para cada muestra de acuerdo a la investigación realizada por Galindo (2016) determinando parámetros tales como:

- pH
- Humedad
- Cenizas
- Carbono Orgánico (%)
- Materia Orgánica (%)

7.6.7 Porcentaje de cenizas de los biopolímeros

La técnica para determinación de cenizas se realizó en los biopolímeros, con la finalidad de obtener en ambas muestras por igual el porcentaje de carbono orgánico, siguiendo a la investigación realizada por Galindo (2016). Se llevó a cabo esta técnica llevando a peso constante un crisol y se registró el peso como P_C , colocando una porción de muestra P_M , se carbonizaron las muestras contenidas en los crisoles para posteriormente calcinarlas por dos horas. Después de ese tiempo se colocó en un desecador para enfriar a temperatura ambiente y se registró el peso final de las cenizas con el crisol como P_{CC} ; la determinación del porcentaje de cenizas se calculó con la ecuación (11) por triplicado para cada muestra.

$$\% \text{ cenizas: } \frac{(P_{CC} - P_C)}{P_M} * 100 \quad (12)$$

P_C =Peso crisol

P_M = Porción de muestra

P_{CC} = Peso crisol mas cenizas

7.6.8 Determinación de carbono orgánico %CO y materia orgánica %MO

Se utilizó el porcentaje de cenizas obtenidas anteriormente para la materia orgánica, se obtuvo con la fórmula siguiente:

$$\% M. O: 100 - \% \text{ Cenizas} \quad (13)$$

Para la obtención de carbono orgánico se utilizó la ecuación utilizando el factor de Van Bemmelen de 1.724 Galindo (2016).

$$\% C. O. : \frac{\% M.O.}{1.724} \quad (14)$$

7.7 Diseño experimental

El experimento se desarrolló en un recipiente con capacidad de 40 L, con una tapa de vidrio para el cierre en condiciones heméticas, y asegurar las condiciones de humedad requeridas. Se cortaron las muestras de 350 mm², se midió su espesor, se registró el peso inicial de la película, se procedió a pasar las muestras en la pecera, y de acuerdo a lo descrito en la ASTM D5988-12 y a la investigación de Galindo (2016), se realizó la proporción necesaria de humus para la cantidad de muestras que se sometieron a degradar, colocando 7429.2 g de humus de lombriz libre de material rocoso; se colocaron 5 laminas del biopolímero A y B, ordenadas de manera vertical sobre el suelo y 5 muestras testigo o blanco (C) de una bolsa comercial compostable (Figura 4). De acuerdo con la información contenida en la bolsa empleada como testigo, el material es regido bajo la normativa ISO 14855-2:2019.

Para proporcionar las condiciones adecuadas del medio se colocó un vaso de precipitados con 1061 ml de agua destilada, para mantener la humedad relativa de 99 % durante el periodo de prueba. Se selló el recipiente marcando temperatura y humedad relativa de T=25±31.1 °C y % HR=99. El medioambiente fue monitoreado con un termo-higrómetro digital de sonda con resolución de 0.1 y 1 % de HR. Las muestras se mantuvieron en el recipiente abierto por media hora para permitir la entrada de aire cada tercer día por los primeros 20 días que inició la prueba, y posteriormente cada cuatro días hasta 110 días donde culminó la prueba.

7.7.1 Prueba de biodegradabilidad ASTM D5988-12

Fueron capturadas imágenes diarias durante 110 días que duró el experimento. Lo anterior para el registro de la biodegradabilidad de las láminas. Finalmente, se determinó la pérdida de masa siguiendo el método modificado empleado por Galindo (2016) y Castro, et al. (2016). Se consideró el peso inicial W₁ y final W₂ de las láminas para cada formulación y blanco, las cuales fueron expuestas al proceso de compostaje. Al finalizar el experimento se utilizó la siguiente ecuación para reportar el promedio de las cinco réplicas de cada biopolímero (formulación A y B), y blanco (C):

$$\text{Pérdida de masa} = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100 \quad (11)$$

Donde:

W_1 : Peso inicial de la lámina.

W_2 : Peso final de la lámina después de 110 días.

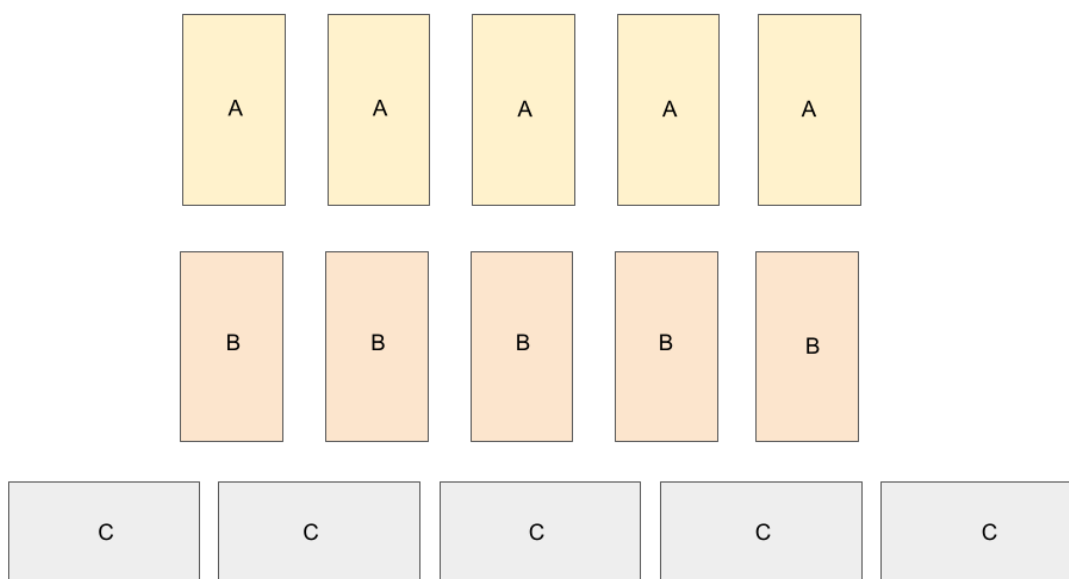


Figura 4. Diseño experimental para el análisis de biodegradabilidad de las formulaciones de biopolímeros. [A] 100 % celulosa de cascarilla de café; [B] 75 % de fibra de bagazo de caña, y 25 % de celulosa de cascarilla de café; [C] Testigo.

7.8 Análisis estadístico

Para el análisis de los datos de los parámetros de humedad, permeabilidad de vapor de agua y solubilidad de ambas formulaciones: (A) 100 % celulosa de cascarilla de café, y (B) 75 % fibra y 25 % celulosa; se aplicó inferencia estadística con intervalos de confianza para muestras pequeñas. Esto, con la finalidad de verificar igualdad de varianzas. Con esta prueba fue posible determinar si las varianzas de las poblaciones A y B son parecidas o diferentes entre sí; asumiendo que las dos muestras presentan una distribución normal. Una vez verificada la igualdad de varianzas, se aplicó el intervalo de confianza de la diferencia de medias de varianzas desconocidas pero iguales; con un intervalo de confianza del 95%. Finalmente se realizó un análisis de varianza ANOVA de un

solo factor haciendo uso del software Statistics para determinar diferencias entre las medias comparando el valor-p con un nivel de significancia (0.05) al evaluar la hipótesis nula.

VIII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

8.0 Caracterización fisicoquímica de los residuos agroindustriales cascarilla de café (*Coffea spp.*) y bagazo de caña de azúcar (*Saccharum spp.*).

El porcentaje de humedad de cascarilla del café (10.54%) se encuentra entre el 8.6% y 15% reportado Arias y Meneses (2016) y Suárez (2018), respectivamente. La humedad obtenida en bagazo de caña fue de 8.35%, menor al 9.16% obtenido por Flores y Del Carmen (2016), y al 13.91 % reportado por Cueva y Monzón (2014) Cuadro 6.

De acuerdo con lo reportado en el Cuadro 6, la determinación porcentual de celulosa en cascarilla de café es inferior (24.75%) al reportado por Collazo, Bigliardi, Ortega, Toro, y Boix (2018) y Arias y Meneses (2016), 35.4% y 36.70 %, respectivamente. Para el bagazo de caña, la contenido de celulosa fue de 33.30 %, menor al reportado por Cueva y Monzón (2014) y Flores y Del Carmen (2016); quienes obtuvieron un 44.87 % y 56,83 % de celulosa, respectivamente.

Cuadro 6. Caracterización fisicoquímica de los residuos agroindustriales cascarilla de café (*Coffea spp.*) y bagazo de caña de azúcar (*Saccharum spp.*).

Muestra	Humedad inicial (%)	Celulosa (%)
Bagazo de caña de azúcar (<i>Saccharum spp.</i>).	8.35±0.23	33.30±0.008
Cascarilla de café (<i>Coffea spp.</i>)	10.54±0.36	24.75±0.61

8.1 Rendimiento

El rendimiento de celulosa se expresa en porcentaje, este fue mayor en la cascarilla de café (32.75%), que en bagazo de caña (29.39%) (Cuadro 7). El rendimiento celulósico por cada 25 g de muestra empleada, fue superior en cascarilla de café (32.75%) que en bagazo de caña de azúcar (29.39 %). Ambos resultados, son superiores a los reportados por Vasquez (2017) y Flores y Del Carmen (2016), para cascarilla de café (12. 82 %) y bagazo de caña (24.70 %), respectivamente.

Cuadro 7. Rendimiento de la celulosa extraída de los residuos agroindustriales.

Muestra	Rendimiento de celulosa (%)
Bagazo de caña de azúcar (<i>Saccharum spp.</i>).	29.3954
Cascarilla de café (<i>Coffea spp.</i>)	32.7516

8.2 Caracterización fisicoquímica de la Celulosa

8.2.1 Humedad

La humedad celulósica del bagazo de caña es menor (4.16%) al obtenido por Flores y Del Carmen (2016) quienes reportan un 6.1 % (Cuadro 8). Es importante que la humedad no supere el 7 % ya que, según Barros (2009); la celulosa es un compuesto inerte y su aplicación como elemento aditivo se limita a la retención de humedad. Puesto que la baja humedad reduce la posibilidad del crecimiento microbiano y su rápida actividad metabólica, impide su deterioro y cambios físico-químicos (Borah et al., 2019; Azmin y Nor, 2020).

Cuadro 8. Características fisicoquímicas de la celulosa de bagazo de caña de azúcar (*Saccharum spp.*) y cascarilla de café (*Coffea spp.*).

Muestra	Celulosa		
	Humedad (%)	Cenizas (%)	α -celulosa (%)
Bagazo de caña de azúcar (<i>Saccharum spp.</i>)	4.16±1.42	0.74±0.08	83.28
Cascarilla de café (<i>Coffea spp.</i>)	3.62±1.23	2.0±0.98	88.80

8.2.2 Cenizas

Los valores de cenizas (0.74 %), en la celulosa del bagazo de caña de azúcar se encuentran dentro del rango reportado por Barros (2009), y Flores y Del Carmen (2016); oscilando entre un 0.5 % y 3.92 %. En cascarilla de café se registró un 2.0 % de ceniza, superior al 0.49 y 0.19% reportado por Collazo et al. (2018) y Aquino, Rodriguez, Mendez, y Hernandez (2012); quienes afirman que el alto contenido de minerales se asocia a la longevidad de los residuos; además de que el contenido de cenizas contenidas en las fibras varía de acuerdo a la especie vegetal, condiciones de suelo y de cultivo.

9.3.3 α -Celulosa

El contenido de α -celulosa del bagazo de caña y de la cascarilla del café fue de 83.28 y 88.80%, respectivamente, es referente a la pureza existente en la celulosa extraída, indicando que presenta para ambos casos un alto grado de pureza superando a los valores obtenidos por Collazo et al.

(2018) con (61.8 %) para la cascarilla de café y para el bagazo de caña de azúcar con (81.79 %), según lo reportado por y Flores y Del Carmen (2016).

9.4. Formulación de biopolímeros

Se observó que las características fisicoquímicas de la celulosa de la cascarilla de café; humedad (3.62%), cenizas (2.0%), α -celulosa (88.80%), y rendimiento (32.75 %) se encuentran dentro de los rangos reportados en la literatura; además de apariencia, morfología y textura, le confieren mayores ventajas para la formulación del biopolímero, tal como se discutió anteriormente. El bagazo de caña presenta una apariencia y textura fibrosa que dificulta su manipulación al homogeneizar la muestra para la elaboración de las láminas del biopolímero. Además, presentó valores inferiores en el rendimiento de la celulosa (29.39 %), α -celulosa (83.28 %), y mayor porcentaje de humedad (4.16%). Por lo anterior, las formulaciones de los biopolímeros fueron establecidas de la siguiente manera:

A) 100 % celulosa de cascarilla de café

B) 25 % celulosa de cascarilla y 75 % fibra de bagazo de caña de azúcar

9.4.1 Caracterización fisicoquímica

De acuerdo con el Cuadro 9, los valores de ceniza (0.361 %), materia orgánica (99.63 %), y carbono orgánico (57.79 %) en la formulación B, son similares (0.383 % de cenizas, 99.63 % de materia orgánica y 57.79 % de carbono orgánico) a los reportados por Galindo (2016).

Cuadro 9. Características fisicoquímicas de los biopolímeros formulados.

BP	pH	Humedad (%)	Cenizas (%)	C.O (%)	M.O (%)	Solubilidad en agua (%)	Permeabilidad de vapor de agua ($\text{mm}\cdot\text{g}\cdot\text{kPa}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}$)
A	7	13.848	0.435	57.751	99.56	50.915	0.479
		\pm	\pm	\pm	\pm	\pm	\pm
B	7	0.406	0.246	0.142	0.246	8.499	0.202
		13.460	0.361	57.794	99.638	53.354	0.664
		\pm	\pm	\pm	\pm	\pm	\pm
		0.381	0.232	0.134	0.232	3.443	0.050

BP: Biopolímeros formulados; C.O.: Carbono orgánico; M.O.:Materia orgánica

Al considerar que las cenizas cuantifican una aproximación de la carga inorgánica del material, se observa que el contenido de sustancias orgánicas en el biopolímero estudiado supera el contenido inorgánico. Con estos valores se tiene una estimación del porcentaje de material susceptible a la biodegradación en el medio compostable (Galindo, 2016; García Barrera, 2020).

9.4.1.1 Humedad

Se observa (Cuadro 10) que existe un porcentaje de humedad ligeramente mayor en el biopolímero A (13.84 %), sin embargo; es menor al 20.89% obtenido por Azmin y Nor (2020). Estas variaciones de humedad se presentan debido a que los materiales celulósicos absorben o desorben lentamente humedad del ambiente hasta alcanzar el equilibrio (Wang, Gardner, Stark, Bousfield, Tajvidi y Cai, 2018).

La formulación B presentó un menor contenido de humedad (13.46 %); a causa del bajo contenido de celulosa y fibra en el biopolímero (Cuadro 10). Destacando que el bajo contenido de humedad evita el crecimiento de moho que altera sus propiedades, sin embargo; cabe destacar que ambos valores se posicionan por debajo de los reportados en la literatura (Azmin y Nor, 2020).

De los valores medios de humedad, se determinó que no existen diferencias estadísticas significativas ($p < 0.05$) entre las formulaciones A y B (Figura 5).

9.4.1. Permeabilidad de Vapor de agua

Estadísticamente, la permeabilidad de vapor de agua (PVA) en ambas formulaciones no presenta diferencias significativas ($p < 0.05$). La PVA del biopolímero A fue de $0.479 \text{ mm}\cdot\text{g}\cdot\text{kPa}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}$, indicando que un mayor contenido de celulosa en la composición del biopolímero mejora las condiciones de barrera al vapor de agua, debido a la naturaleza hidrófoba de la celulosa Majeed et al. (2013); A diferencia del biopolímero B ($0.664 \text{ mm}\cdot\text{g}\cdot\text{kPa}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}$) el cual presenta mayor ganancia de vapor de agua (Figura 6).

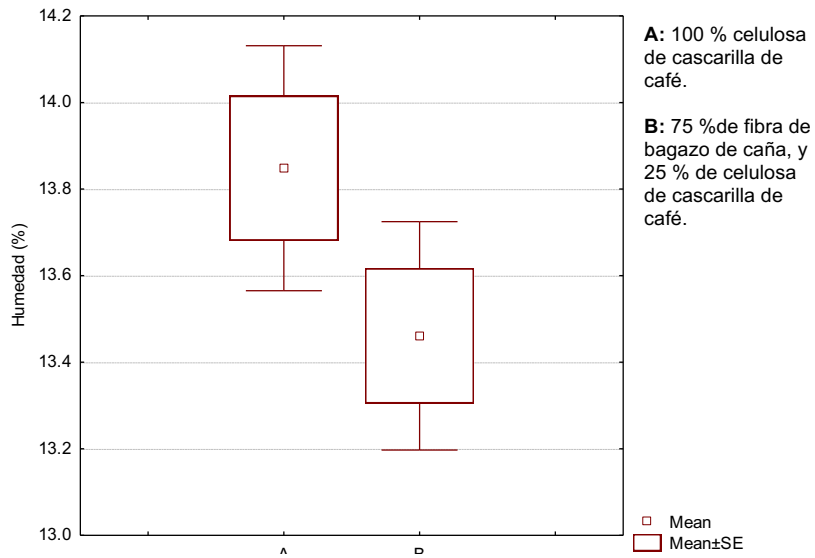


Figura 5. Análisis del contenido de humedad (%) de los biopolímeros formulados ($p < 0.05$). [A] 100 % celulosa de cascarilla de café; [B] 75 % de fibra de bagazo de caña, y 25 % de celulosa de cascarilla de café.

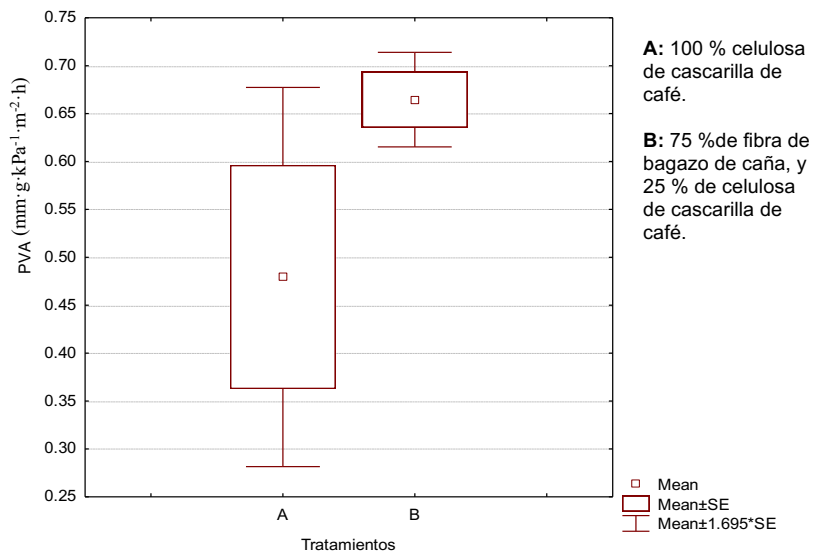


Figura 6. Análisis de permeabilidad de vapor de agua de los biopolímeros formulados ($p < 0.05$). [A] 100 % celulosa de cascarilla de café; [B] 75 % de fibra de bagazo de caña, y 25 % de celulosa de cascarilla de café.

La disminución de la PVA se asocia con la hidrofiliidad de los grupos hidroxilos presentes en las fibras, las cuales actúan como una barrera que impide que penetre el vapor de agua (Majeed et al., 2013). Los valores obtenidos (Cuadro 10) indican que la formulación del biopolímero A posee mejores condiciones de control de vapor de agua, por las características morfológicas de la celulosa (polvo fino); a diferencia del biopolímero B el cual solo posee 25% de este compuesto. Esta particularidad le confiere mayores aplicaciones debido a la disminución de la transferencia de vapor de agua; es decir, la formulación del biopolímero A puede prevenir la transferencia de humedad entre éste y el compuesto que entre en contacto con él. Esta característica se relaciona con los enlaces de hidrógeno presentes en la celulosa que previenen la formación de huecos por donde pudieran pasar las moléculas de agua (Luchese et al., 2015; Azmin y Nor, 2020). Los derivados de la celulosa, también son factibles de aplicación como películas y/o recubrimientos, para la conservación de alimentos, entre otros (Azmin y Nor, 2020). En el caso del biopolímero B, la permeabilidad de vapor de agua puede mejorarse empleando técnicas específicas de molienda que permitieran que la fibra reduzca su tamaño de partícula reduciéndose a un polvo fino; con la finalidad de aumentar la superficie de contacto entre la materia prima y los plastificantes utilizados, y evitar la existencia de espacios libres en la lamina plástica, limitando el paso de las moléculas de agua entre estos (Agustin et al., 2014).

9.4.2 Solubilidad en agua

De acuerdo con los valores obtenidos en las pruebas de solubilidad en agua, se observó que no existen diferencias significativas ($p, <0.05$) entre las formulaciones A y B (Figura 7).

La solubilidad en agua para el biopolímero A (50.91 %) es menor al biopolímero B (53.35 %). Este incremento se debe a la cantidad de celulosa utilizada en la formulación, ya que esta es un compuesto insoluble en agua; es decir, a mayor contenido de celulosa, menor la solubilidad del biopolímero en agua. Es importante mencionar que la formulación del biopolímero dependerá de la aplicación del mismo, y con esto el contenido de celulosa (Morales, 2014; Flores y Del Carmen, 2016). Según Moreno Toasa (2015), no es necesario que las biopelículas absorban demasiada agua, favoreciendo la propiedad de los polímeros de ser impermeables e insolubles. Se han reportado valores entre 9 y 35 % de solubilidad en láminas de almidón de yuca (Paspuel (2016), y un 16 y 38 % en bioláminas de almidón de café y maíz (Toala y Sarmiento (2019b). Sin embargo, se han registrado valores entre 47.96 y 53.22 % en formulaciones similares a las presentadas en esta

investigación, en películas comestible a base de celulosa de bagazo (Flores y Del Carmen (2016). De acuerdo con esto, los biopolímeros formulados (A y B) presentan una solubilidad media, aptos para recubrimiento de humedad media.

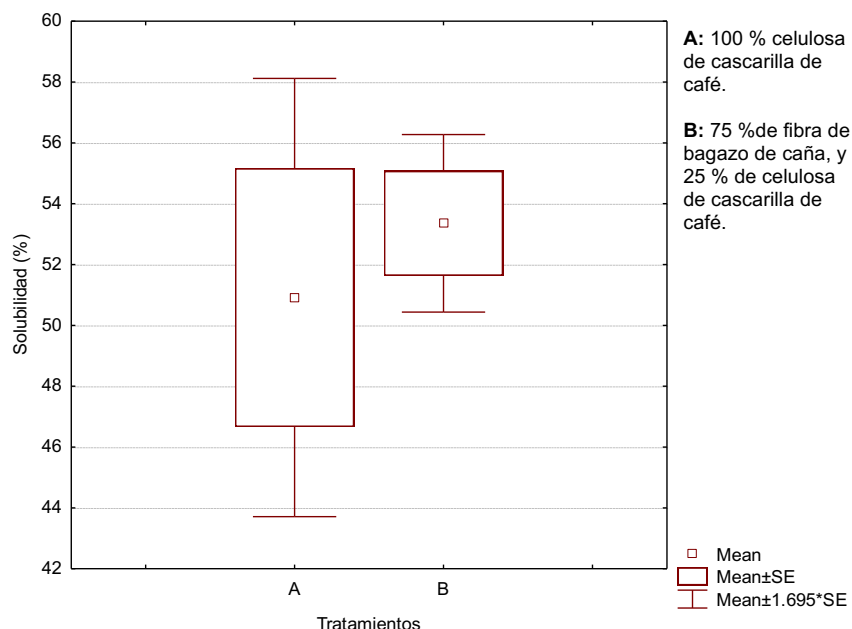


Figura 7. Análisis de la solubilidad en agua de los biopolímeros formulados ($p < 0.05$). [A] 100 % celulosa de cascarilla de café; [B] 75 % de fibra de bagazo de caña, y 25 % de celulosa de cascarilla de café.

9.5 Prueba de biodegradabilidad ASTM D5988-12

Se llevó un registro fotográfico de la biodegradabilidad de las láminas de los biopolímeros formulados (Anexo 1), de acuerdo a la técnica modificada por Galindo (2016) y Castro et al. (2016).

Los valores referentes a las medias obtenidas de la pérdida de masa y porcentaje de biodegradabilidad se observan en el cuadro 11. La pérdida de masa reportada durante los 110 días del experimento fue del 84.41 y 77.49%, correspondientes a la formulación A y B, respectivamente; superando el 60 % de biodegradabilidad como establece la norma ASTM D5988-12.

Por otro lado, la muestra testigo (C) no presentó cambios estructurales y tampoco pérdida de masa durante el experimento, aún cuando la información impresa en este material establece que su biodegradación es de 60 a 180 días, de acuerdo con lo establecido en la norma ISO 14855-2:2019.

El biopolímero A se degradó un 84 % valor superior a lo obtenido por Toala y Sarmiento (2019b) superando un 60 % de biodegradabilidad en bolsas elaboradas con cascarilla de café (*Coffea arabica*) y almidón de maíz (*Zea mays*) en un periodo de 6 semanas. Al igual que Meza (2016) con un bioplástico elaborado a partir de residuos de papa obteniendo un 80 % de biodegradabilidad en un lapso de 10 semanas. Ambos biopolímeros fueron susceptibles a la biodegradabilidad superando el 60 % estimado que dicta la norma, a diferencia de la muestra testigo que no presentó cambio alguno.

Cuadro 10. Porcentaje de biodegradabilidad de los biopolímeros formulados durante 110 días de experimento.

Tratamiento	Peso (g)		Biodegradación (%)
	Inicial	Final	
A	1.9000 ± 0.1611	0.2968 ± 0.0910	84.41%
B	2.0346 ± 0.1529	0.4578 ± 0.0801	77.49%
C (Testigo)	0.0636 ± 0.0069	0.0636 ± 0.0069	0 %

IX. CONCLUSIONES

La estructura de la celulosa del bagazo de caña de azúcar (*Saccharum spp.*) es de apariencia y textura fibrosa, presentando dificultades en su manipulación en la elaboración de biopolímeros; además presenta un valor superior en el contenido de humedad. Sin embargo, tiene potencial para otros usos como la fabricación de papel artesanal. La estructura de la celulosa micro cristalina de la cascarilla de café, obtenida como un polvo blanco, fino, e inodoro; presenta mayores ventajas en su manipulación, aumentando la superficie de contacto y adherencia para la elaboración de biopolímeros.

La celulosa extraída de la cascarilla de café es potencialmente útil para la elaboración de biopolímeros debido a las características del contenido de celulosa referentes al grado de pureza de la misma (88.80 %), superiores al bagazo de caña de azúcar (83.28%). Este elemento se refiere a la celulosa micro cristalina despolimerizada y purificada, libre de contaminantes orgánicos e inorgánicos. Además, presenta un rendimiento mayor (32.75 %) a la celulosa de bagazo de caña (29.39 %).

Se determinó que no existen diferencias significativas en el contenido de humedad de ambos biopolímeros (A y B), descartando que los valores son inferiores a los reportados en la literatura. Esta condición es de importancia para evitar el crecimiento de moho que pudiera afectar las propiedades de cada formulación.

El biopolímero A (100% celulosa de cascarilla de café) presentó menor permeabilidad de vapor de agua, debido a la existencia de mayor porcentaje de celulosa en su composición; lo que mejora sus condiciones de barrera al vapor de agua. Como resultado de esto, el biopolímero A puede ser utilizado para prevenir la transferencia de humedad en películas y recubrimientos para la conservación de alimentos, entre otros. Además, su solubilidad de agua confirma su propiedad insoluble, esto es, a mayor contenido de celulosa, menor solubilidad y reactividad.

El biopolímero B (75% fibra de bagazo de caña y 25% celulosa de cascarilla de café) presentó menor contenido de humedad (13.46 %), lo que es una característica adecuada para evitar el crecimiento

de moho; sin embargo presenta mayor ganancia de vapor de agua por la disminución porcentual de celulosa en su composición. Es posible mejorar la permeabilidad de vapor de agua empleando técnicas específicas de molienda para reducir el tamaño de partícula a un polvo fino. Esto, con la finalidad de aumentar la superficie de contacto entre la materia prima y los plastificantes utilizados, y evitar la formación de espacios libres entre los que pudieran atravesar las moléculas de agua.

La celulosa extraída de los residuos agrícolas tiene gran potencial para ser aprovechada en varias aplicaciones industriales, destacando la industria farmacéutica; como materia prima en cremas y aerosoles; en la alimenticia como aditivo, y en productos de leche y pastelería como removedor de contaminantes. El desarrollo de este tipo de biocompuestos a partir de desechos agroindustriales genera beneficios al medio ambiente, disminuye el impacto ambiental y contribuye en la sustentabilidad de la actividad agrícola.

La prueba de biodegradabilidad siguiendo a la norma ASTM D5988-12 indicó que bajo condiciones controladas de temperatura y humedad relativa, los biopolímeros son compostables en un periodo menor a cuatro meses (110 días), biodegradándose hasta en un 84.41 y 77.49%, correspondientes al biopolímero: (A) 100% celulosa y (B) 75% fibra de bagazo de caña y 25% celulosa, respectivamente; convirtiéndose la mayor parte de la masa de ambas formulaciones en materia orgánica y CO₂.

De acuerdo con la hipótesis planteada; las características fisicoquímicas de los residuos agroindustriales del café (*Coffea spp.*) y caña de azúcar (*Saccharum spp.*) son las mínimas requeridas para la obtención de compuestos biopolímeros debido a su contenido de celulosa, grado de pureza, humedad celulósica, vapor de agua y solubilidad; además del rendimiento y potenciales aplicaciones de cada biopolímero formulado.

X. ANEXO I

Memoria fotográfica

1.0 Pretratamiento general de residuos.



Figura 8. Pretratamiento del bagazo de caña de azúcar.



Figura 9. Pretratamiento de cascarilla de café.



Figura 10. Cascarilla de café (*Coffea* spp.).



Figura 11. Tamizado de residuos agroindustriales.

2.0. Extracción de celulosa para cascarilla de café (*Coffea* spp.)



Figura 12. Filtrado de cascarilla tratada con NaOH.

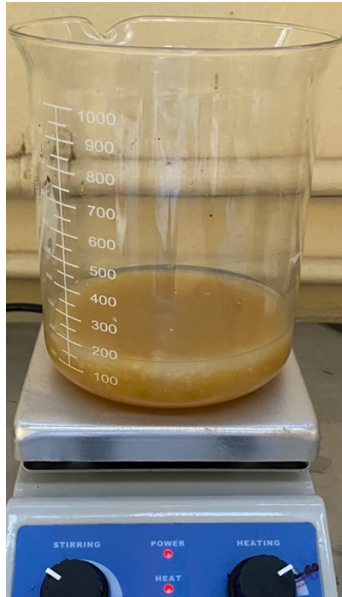


Figura 13. Primer blanqueo de fibra con NaCl₂.



Figura 14. Filtrado de la fibra blanqueada.



Figura 15. Fibra completamente blanqueada.



Figura 16. Celulosa de cascarilla de café.



Figura 17. Celulosa de cascarilla de café pulverizada.

2.1. Extracción de celulosa para bagazo de caña de azúcar (*Saccharum* spp.)

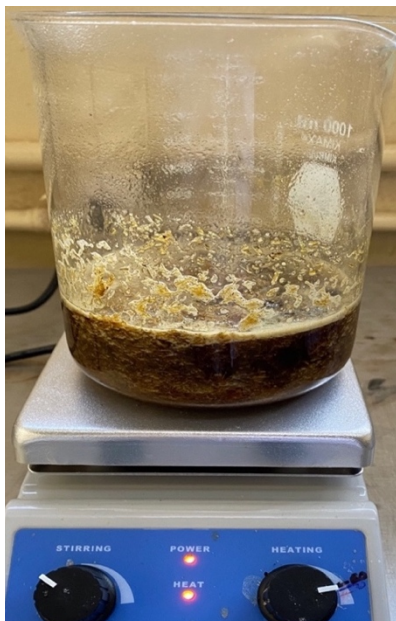


Figura 18. Tratamiento con NaOH.



Figura 19. Filtración de bagazo tratado con NaOH.

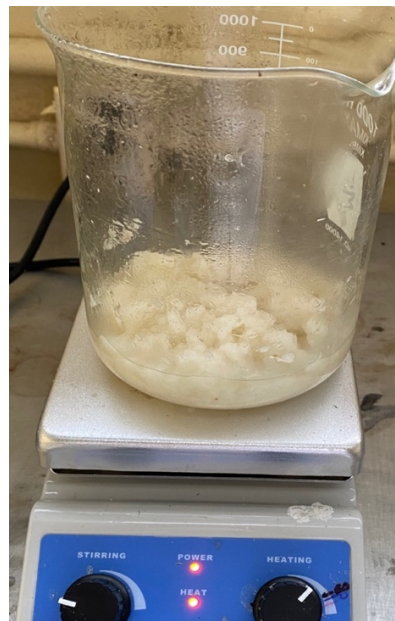


Figura 20. Blanqueo de bagazo con NaCl₂.



Figura 21. Filtrado de bagazo blanqueado con NaCl₂.



Figura 22. Celulosa de bagazo de caña de azúcar.

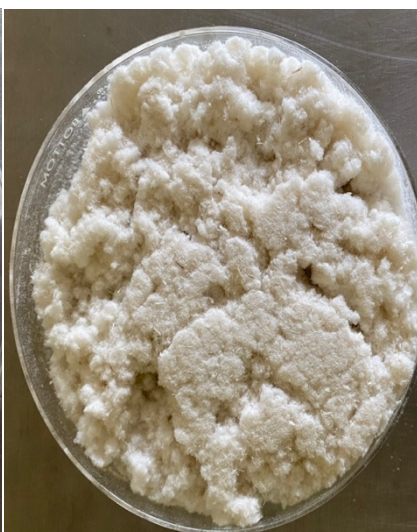


Figura 23. Celulosa de bagazo pulverizada.

2.2. Fibra extraída bagazo y cascarilla



Figura 24. Fibra extraída de bagazo.

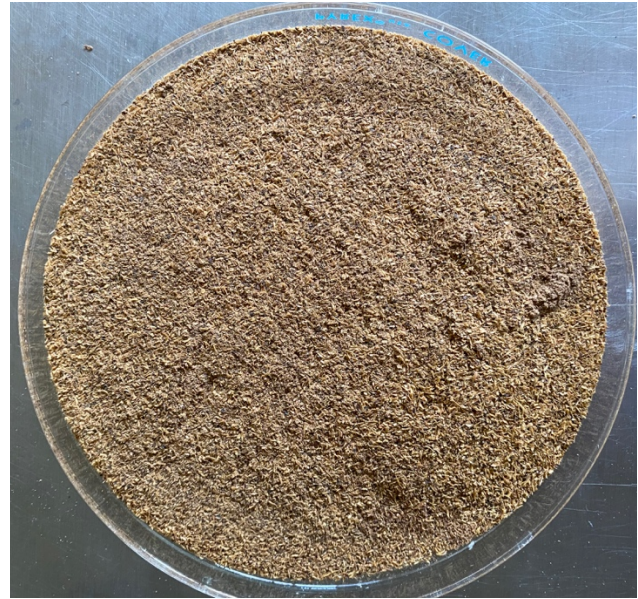


Figura 25. Fibra extraída de cascarilla de café.

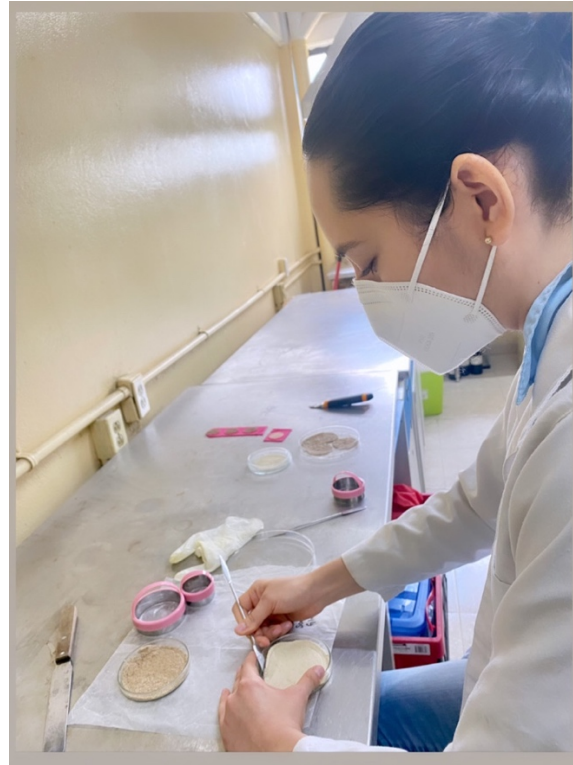
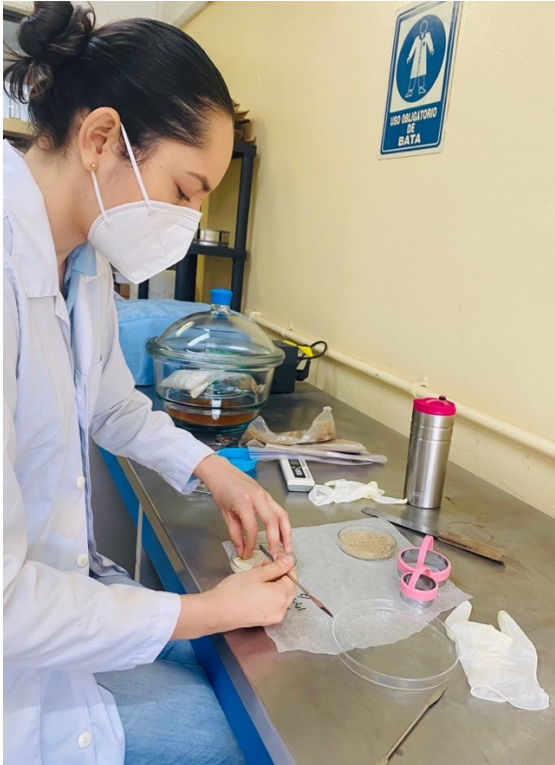


Figura 26. Proceso de elaboración de biopolímeros.

2.3 Formulación de Biopolímero



Figura 27. Elaboración de biopolímero composición 100 % celulosa.



Figura 28. Elaboración de biopolímero composición 75 % Fibra y 25 % celulosa.



Figura 29. Aspectos de las formulaciones de biopolímeros.

2.4 Caracterización de biopolímeros



Figura 30. Biopolímero 100 % Celulosa.



Figura 31. Biopolímero 25-75 %
Celulosa y Fibra.

3.0 Evidencias del Proceso de biodegradabilidad.



Día 1.



Día 110.

XI. ANEXO II

1.0 Elaboración de vermicomposta

Se llevó a cabo la elaboración de una vermicomposta, adquiriendo aproximadamente 400 individuos de lombrices rojas californianas de la especie *Eisenia Foetida*; provenientes del criadero “Jardines Comestibles”, se elaboró la vermicompostera utilizando dos cajas de plástico oscuro y una de menor tamaño que sirviera como escalón para separar ambas cajas, se dispusieron las mismas a manera de niveles en donde la caja superior se agujereó en el fondo para que funcionara como filtración de los lixiviados generados por la descomposición de la materia orgánica y se depositarán en la segunda caja del fondo.

Posteriormente se procedió al acondicionamiento de la vermicompostera colocando la primera capa del fondo la cual debe ser materia seca como tierra con hojarasca, troncos pequeños etc. posteriormente se colocó la capa de materia orgánica o residuos de alimentos como cáscaras de fruta o verdura, cuidando de no utilizar residuos muy ácidos que pudieran afectar al desarrollo normal de la especie en el medio. Otro punto importante a considerar es que por cada capa húmeda que se le agregue a la vermicomposta se debe cubrir con materia seca, para evitar la propagación de especies depredadoras como moscas, lombrices o cucarachas que afecten a la reproducción de las lombrices.

Finalmente se colocaron las lombrices rojas californianas, consecuentemente se monitoreo de manera constante que la especie se adaptara al hábitat nuevo, regulando condiciones como temperatura, humedad y alimentación. Se continuó monitoreando la vermicomposta durante un periodo aproximado de 3 meses, hasta la producción suficiente de humus de lombriz, para llevar a cabo la prueba de biodegradabilidad de la presente investigación.

2.0. Caracterización del suelo

Se utilizó humus de lombriz y determinaron parámetros por triplicado para cada muestra de acuerdo a la norma NMX-FF-109-SCFI-2008, especificaciones y métodos de prueba tales como:

- pH,
- Humedad
- Cenizas
- Carbono Orgánico (%)
- Materia Orgánica (%)

2.1. pH del suelo

Por medio de un potenciómetro (calibrado). Se realizó una suspensión de humus de lombriz en agua destilada en relación 1:15 con agitación continua, para tomar por triplicado la lectura del pH de la solución se tomaron las muestras por triplicado en puntos distintos para asegurar la homogeneidad del humus.

2.2. Humedad en suelo

Se llevo a cabo la técnica de determinación de humedad en el suelo seguido por lo descrito por Galindo (2016) y de acuerdo a la norma NMX-FF-109-SCFI-2008, dicha prueba consistió en llevar a peso constante un crisol y registrar su peso (P), se pesaron 10 g de humus de lombriz húmedo (P₁) en el crisol, se secaron en la estufa a 70 °C por 24 horas; se colocó en un desecador a temperatura ambiente para acondicionar la muestra, se pesó el crisol con humus seco (P₂), y finalmente se calculó el porcentaje de humedad presente en el suelo, a partir de la siguiente ecuación (12) por triplicado para cada muestra.:

$$\% \text{ humedad: } \frac{(P+P_1)-(P_2)}{P_1} * 100 \quad (1)$$

P= Peso crisol

P1= Peso crisol mas muestra

P2 = Peso más muestra seca

2.3. Porcentaje de cenizas del suelo

La técnica para determinación de cenizas se realizó en los biopolímeros y en el humus de lombriz, con la finalidad de obtener en ambas muestras por igual el porcentaje de carbono orgánico, siguiendo a la investigación realizada por Galindo (2016). Se llevó a cabo esta técnica llevando a peso constante un crisol y se registró el peso como P_C , colocando una porción de muestra P_M , se carbonizaron las muestras contenidas en los crisoles para posteriormente calcinarlas por dos horas. Después de ese tiempo se colocó en un desecador para enfriar a temperatura ambiente y se registró el peso final de las cenizas con el crisol como P_{CC} ; la determinación del porcentaje de cenizas se calculó con la ecuación (1) por triplicado para cada muestra.

$$\% \text{ cenizas: } \frac{(P_{CC}-P_C)}{P_M} * 100 \quad (2)$$

P_C =Peso crisol

P_M = Porción de muestra

P_{CC} = Peso crisol mas cenizas

2.4. Determinación de carbono orgánico %CO y materia orgánica %MO

Se utilizó el porcentaje de cenizas obtenidas anteriormente para la materia orgánica, se obtuvo con la fórmula siguiente:

$$\% M. O: 100 - \% \text{ Cenizas} \quad (3)$$

Para la obtención de carbono orgánico se utilizó la ecuación utilizando el factor de Van Bemmelen de 1.724

$$\% C. O. : \frac{\% M.O.}{1.724} \quad (4)$$

2.5. Caracterización fisicoquímica del humus de lombriz

Se caracterizó el humus de lombriz para determinar parámetros para la prueba de biodegradación, incluyendo pruebas de pH, humedad, cenizas, y porcentaje de carbono orgánico (C.O) y materia orgánica (M.O); obteniendo los siguientes valores mostrados en el Cuadro 11.

Cuadro 11. Determinación de características fisicoquímicas en humus de lombriz

Muestra	pH	Humedad (%)	Cenizas (%)	C.O (%)	M.O (%)
Humus de lombriz	6.506 ± 0.306	51.56 ± 0.43	1.02 ± 0.08	57.40 ± 0.04	98.97 ± 0.085

En el Cuadro 11 se muestran los valores obtenidos de la caracterización fisicoquímica del humus de lombriz obteniendo valores superiores a los reportados por Galindo (2016) para el caso de la humedad, el autor reporta 37.37 %; y para el % C.O 26.67 %; cabe destacar que las condiciones en las que se desarrolló la vermicomposta son muy particulares, a diferencia de otros autores.

XII. LITERATURA CITADA

- Abarca Flores, L. P. (2012). Incorporación de nanopartículas de arcilla en películas comestibles de quitosano-quínoa (*Chenopodium quinoa* Willd.).
- Abdul-Latif, N.-I. S., Ong, M. Y., Nomanbhay, S., Salman, B. y Show, P. L. (2020). Estimation of carbon dioxide (CO₂) reduction by utilization of algal biomass bioplastic in Malaysia using carbon emission pinch analysis (CEPA). *Bioengineered*, 11, (1), 154-164
- Adhikari, D., Mukai, M., Kubota, K., Kai, T., Kaneko, N., Araki, K. S. y Kubo, M. (2016). Degradation of bioplastics in soil and their degradation effects on environmental microorganisms. *Journal of Agricultural Chemistry and Environment*, 5, (01), 23
- Aguilar, R., Valiente, Y., Oliver, D., Franco, C., Díaz, F., Méndez, F. y Luna, C. (2018). Inadecuado uso de residuos sólidos y su impacto en la contaminación ambiental. *SCIÉND0*, 21, (4), 401-407. doi:<http://dx.doi.org/10.17268/sciencdo.2018.044>
- Aguilar Rivera, N. (2014). Reconversión de la cadena agroindustrial de la caña de azúcar en Veracruz México. *Nova scientia*, 6, (12), 125-161 Retrieved from <http://www.scielo.org.mx/pdf/ns/v6n12/v6n12a7.pdf>
- Aguirre, M. y Poveda, C. (2011). Jugo de caña de azúcar envasado en vidrio. Retrieved from <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/13423>
- Agustin, M. B., Ahmmad, B., Alonzo, S. M. M. y Patriana, F. M. (2014). Bioplastic based on starch and cellulose nanocrystals from rice straw. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 33, (24), 2205-2213. doi:<https://doi.org/10.1177/0731684414558325>
- Alfaro, B., Juan Manuel. (2001). *Ciencias del ambiente Colección de estudios Generales*. In C. E. Continental (Ed.), (pp. 363).
- Alventosa Carbó, J. (2020). *Efecto de la incorporación de antimicrobianos en la biodegradación y compostaje de films activos para el envasado de alimentos*.
- Aquino, L., Rodríguez, J., Méndez, A. y Hernández, S. (2012). Extraction and characterization of nopal (*Opuntia ficus indica*) fiber. *Naturaleza y desarrollo*, 10, 46-63
- Area, M. C. y Vallejos, M. E. (2016). Bio-productos y bio-materiales a partir de la biorrefinería de residuos agro y forestoindustriales. *Panorama de la industria de celulosa y papel y materiales lignocelulósicos*, 120-151 Retrieved from https://www.eucalyptus.com.br/artigos/2016_Panorama_Cap07_BioProductos+BioMateriales.pdf
- Arias, O., Rosa Angélica y Meneses, C., Juan Daniel. (2016). *Caracterización físico-química de residuos agroindustriales (cascarilla de arroz y cascarilla de café), como materia prima potencial para la obtención de bioetanol, Laboratorios de Química UNAN-Managua I-II semestre 2016*. Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua, Retrieved from <http://repositorio.unan.edu.ni/id/eprint/3793>
- Ayala, S. L. G. y Sanabria, F. L. Y. (2018). Aprovechamiento de recursos renovables en la obtención de nuevos materiales. *Ingenierías USBMed*, 9, (1), 69-74. doi:<https://doi.org/10.21500/20275846.3008>
- Azmin, S. N. H. M. y Nor, M. S. M. (2020). Development and characterization of food packaging bioplastic film from cocoa pod husk cellulose incorporated with sugarcane bagasse fibre. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, 5, (4), 248-255
- Badrán, I. M. R., Ocampo, I. L., Cruz, J. S., Trejo, J. F. G. y Gutiérrez, C. A. (2019). Biocombustibles sólidos: una alternativa económica y sostenible para la generación de

- energía eléctrica en México. *DIGITAL CIENCIA@ UAQRO*, 12, (2), 61-66 Retrieved from <http://ciencia.uaq.mx/index.php/ojs/article/view/44>
- Ballesteros Paz, L. V. (2014). Los bioplásticos como alternativa verde y sostenible de los plásticos basados en petróleo. *Ingenierías USB Cartagena*, Retrieved from <http://hdl.handle.net/10819/2247>
- Barrera, G. (2015). *Obtención de un polímero biodegradable a partir de almidón de maíz*. Escuela Especializada en Ingeniería ITCA, Santa Tecla. Retrieved from <http://hdl.handle.net/10972/2436>
- Barros, C. (2009). *Los aditivos en la alimentación de los españoles y la legislación que regula su autorización y uso*: Editorial Visión Libros.
- Basu, P. (2010). *Biomass gasification and pyrolysis: practical design and theory* (Academic Press Ed.): Academic press.
- Beelaerts, C. (2011). Coffee trade: a basic lesson on the economics of the price of coffee. *Global Coffee Report*. <https://globalcoffeereview.com/economics/view/coffeconomics>.
- Belitz, H.-D., Grosch, W. y Schieberle, P. (2009). Coffee, tea, cocoa. *Food chemistry*, 938-970. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-540-69934-7_22
- Beninia, K., Voorwald, H. J. C. y Cioffi, M. (2011). Mechanical properties of HIPS/sugarcane bagasse fiber composites after accelerated weathering. *Procedia Engineering*, 10, 3246-3251
- Bilo, F., Pandini, S., Sartore, L., Depero, L. E., Gargiulo, G., Bonassi, A., Federici, S. y Bontempi, E. (2018). A sustainable bioplastic obtained from rice straw. *Journal of Cleaner Production*, 200, 357-368. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.252>
- Blanca, B. H., Azucena, T. D. Y. y Adriana, L. T. (2008). Utilización de residuos agroindustriales. *Revista Sistemas Ambientales*, 2, (1), 44-50 Retrieved from https://www.researchgate.net/profile/Blanca_Barragan/publication/310441706_UTILIZACION_DE_RESIDUOS_AGROINDUSTRIALES/links/582d2bcb08ae004f74b94c1c/UTILIZACION-DE-RESIDUOS-AGROINDUSTRIALES.pdf
- Borah, A., Balasubramanian, S., Kaur, A., Kaur, J., Sukhija, S. y Balasubramanian, S. (2019). Thermal and microbial characteristics of barley pasta as affected by moisture content. *Our Herit*, 67, 300-314
- Brinchi, L., Cotana, F., Fortunati, E. y Kenny, J. (2013). Production of nanocrystalline cellulose from lignocellulosic biomass: technology and applications. *Carbohydrate polymers*, 94, (1), 154-169. doi:<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.01.033>
- Cabrera, León, F., Vivian, Pérez, M., De la Caridad, A. y Dopico, R., Daisy. (2016). Caracterización de residuos agroindustriales con vistas a su aprovechamiento. *Centro azúcar*, 43, (4), 27-35 Retrieved from <http://centrozucar.uclv.edu.cu/>
- Cabrera, E., Muñoz, M. J., Martín, R., Caro, I., Curbelo, C. y Díaz, A. B. (2014). Alkaline and alkaline peroxide pretreatments at mild temperature to enhance enzymatic hydrolysis of rice hulls and straw. *Bioresource technology*, 167, 1-7. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.05.103>
- Calo, M. y Wise, T. A. (2005). Revaluing peasant coffee production: Organic and fair trade markets in Mexico. *Global Development and Environment Institute, Tufts University*, Retrieved from <http://ase.tufts.edu/gdae/pubs/rp/RevaluingCoffee05.pdf>
- CamBioTec. (2018). Analisis de competitividad del sector plastico en el estado de mexico Retrieved from http://www.comecyt.edomex.gob.mx/media/filer_public/14/64/1464ffb1-49cf-4be3-9c65-98b6d07cb891/competitividad_sector_plasticos.pdf

- Cardoso, M. F. G., Green, S. J., Trespalacios, R. A. N., Paz, M. S. y Arellano, L. C. D. (2016). BIOPLÁSTICOS: SOLUCIONES AMBIENTALES. *Escuela de procedencia: Instituto Asunción de México, Mexico*, Retrieved from <http://vinculacion.dgire.unam.mx/vinculacion-1/Memoria-Congreso-2016/trabajos-ciencias-biologicas/biologia/11.pdf>
- Castellanos, M., Raúl. (2013). *Percepción de los problemas ambientales por parte de la población en la ciudad de Naranjos, Veracruz*. (Especialista en Gestión e Impacto Ambiental), Universidad Veracruzana, Poza Rica – Tuxpan. Retrieved from <http://cdigital.uv.mx/handle/123456789/42327>
- Castro, C. A. C., López, L. N. T. y Benítez, L. P. T. (2016). Evaluación de la degradación ambiental de bolsas plásticas biodegradables. *Informador técnico*, 80, (1), 24-31
- Cazaurang, M., MN, Peraza, S., SR y Cruz, R., CA. (1990). Dissolving grade pulps from hennequen fiber. *Cellulose Chemistry and Technology*, 24, (5), 629-638
- Chariguamán. (2015). Caracterización de bioplástico de almidón elaborado por el método de casting reforzado con albedo de maracuyá (*Passiflora edulis* spp.).
- Chariguamán, C. y Jimmy, A. (2015). Caracterización de bioplástico de almidón elaborado por el método de casting reforzado con albedo de maracuyá (*Passiflora edulis* spp.).
- Chen, D., Lawton, D., Thompson, M. y Liu, Q. (2012). Biocomposites reinforced with cellulose nanocrystals derived from potato peel waste. *Carbohydrate polymers*, 90, (1), 709-716. doi:<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2012.06.002>
- Collazo, Bigliardi, S., Ortega, Toro, R. y Boix, A. C. (2018). Isolation and characterisation of microcrystalline cellulose and cellulose nanocrystals from coffee husk and comparative study with rice husk. *Carbohydrate polymers*, 191, 205-215
- CONADESUCA. (2015). Ficha técnica del cultivo de la caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.). In: Gobierno de México MEX.
- CONADESUCA. (2019). *Reporte Final de Producción de Caña y Azúcar*. Retrieved from <https://www.gob.mx/conadesuca/>.
- CONADESUCA. (2021). *Décimo segundo reporte de avance de producción de la zafra 2020/21*. Retrieved from <https://www.gob.mx/conadesuca/articulos/noveno-reporte-de-avance-de-produccion-de-la-zafra-2020-21?idiom=es>.
- Corredor, Y. A. V. y Pérez, L. I. P. (2018). Aprovechamiento de residuos agroindustriales en el mejoramiento de la calidad del ambiente. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 14, (1), 59-72. doi:<https://doi.org/10.18359/rfcb.3108>
- Cortés, D., Díaz, S., Cabal, A. y Del Ángel, O. (2013). Análisis del sector agroindustrial piloncillero en la región Huatusco-Fortín, Veracruz. *Ciencias Agropecuarias Handbook II*, 13 Retrieved from <https://ecorfan.org/handbooks/pdf/CAC2.pdf>
- Cueva, M. B. R. y Monzón, A. H. (2014). Evaluación de residuos agrícolas para la producción del hongo *Pleurotus ostreatus*. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, 48, (1), 54-59
- Cury, K., Aguas, Y., Martínez, A., Olivero, R. y Ch, L. C. (2017). Residuos agroindustriales su impacto, manejo y aprovechamiento. *Revista Colombiana de Ciencia Animal-RECIA*, 9, (S1), 122-132. doi:<https://doi.org/10.24188/recia.v9.nS.2017.530>
- Díaz, L. L., Portocarrero, E. T., Moreira, D. y Bustamante, M. (2002). *Manual de producción de caña de azúcar (Saccharum officinarum L.)*. Retrieved from <http://hdl.handle.net/11036/2247>

- DOF. (2014). Programa Nacional de la Agroindustria de la Caña de Azúcar 2014-2018. *Diario Oficial de la Federación*, Retrieved from https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5343244&fecha=02/05/2014
- Eriksen, M., Lebreton, L. C., Carson, H. S., Thiel, M., Moore, C. J., Borerro, J. C., Galgani, F., Ryan, P. G., et al. (2014). Plastic pollution in the world's oceans: more than 5 trillion plastic pieces weighing over 250,000 tons afloat at sea. *PloS one*, 9, (12), e111913. doi:<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0111913>
- Estrada, Á., Julián, Aranda, E. M., Pichard, D., Gastón y Henao-Uribe, F. J. (2013). Ensilaje de caña de azúcar integral enriquecido con porcinoza fresca. *Orinoquia*, 17, (1), 38-49 Retrieved from <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=89629826005>
- Figueroa Hernández, E., Pérez Soto, F. y Godínez Montoya, L. (2015). Importancia de la comercialización del café en México. In S. C. ECORFAN-México (Ed.), *Ciencias Sociales: Economía y Humanidades*. Retrieved from <http://hdl.handle.net/20.500.11799/41277>.
- Flores, B. y Del Carmen, V. (2016). *Envoltura comestible a base de celulosa microcristalina de bagazo de caña de azúcar*. (INGENIERIA AGROINDUSTRIAL), Ibarra, Ecuador. Retrieved from <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/5313>
- Galindo, M. G. I. (2016). *Obtención de láminas de almidón de maíz termoplástico reforzadas con fibra de agave y evaluación de algunas de sus propiedades*. (Maestría en Ciencias en Ingeniería Química), Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México.
- Gañán, P., Zuluaga, R., Castro, C., Restrepo-Osorio, A., Cock, J. V., Osorio, M., Montoya, Ú., Vélez, L., et al. (2017). Celulosa: Un polímero de siempre con mucho futuro. *Revista Colombiana de Materiales*, (11), 1-4 Retrieved from <https://revistas.udea.edu.co/index.php/materiales/article/view/328779>
- García, Bordallo, L., Eduardo, Dopico, R., Daisy y Cordero, F., Dolores. (2013). Obtención de celulosa microcristalina a partir del bagazo de la caña de azúcar. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, 47, (1), 57-63 Retrieved from <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223126409008>
- García, Salgado García, S., Bolio López, G., Córdova Sánchez, S., Lagunes Espinoza, L., Falconi Calderón, R. y L, V. (2017). Métodos para extraer celulosa de la paja de caña de azúcar (*Saccharum spp.*). *AgroProductividad*, 10, (11), 54-60
- García Barrera, A. V. (2020). Diseño innovador para la obtención y caracterización de un bioplástico utilizando como materia base la fibra de la cáscara de coco y papaya.
- García Vargas, C. C. (2017a). *Obtención de un material biocompuesto a partir de bagazo de caña de azúcar y caucho natural como sustituto del plástico*. (INGENIERA AMBIENTAL), Universidad Cesar Vallejo, Lima-Perú. Retrieved from <https://hdl.handle.net/20.500.12692/3533>
- García Vargas, C. C. (2017b). *Obtención de un material biocompuesto a partir de bagazo de caña de azúcar y caucho natural como sustituto del plástico*. (Ingeniería Ambiental), UNIVERSIDAD CESAR VALLEJO, LIMA – PERÚ. Retrieved from <https://hdl.handle.net/20.500.12692/3533>
- Garg, V. K., Suthar, S. y Yadav, A. (2012). Management of food industry waste employing vermicomposting technology. *Bioresource technology*, 126, 437-443
- Gibson, M., Mihael. (2017). *Evaluación y proyección financiera para determinar la viabilidad y rentabilidad de una empresa dedicada a la producción de empaques biodegradables* (Ingeniería Civil), Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México). Retrieved from <http://132.248.52.100:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/14865>

- González, Á., Dubán Ovidio. (2013). *Aprovechamiento de residuos agroindustriales para la producción de alimentos funcionales: una aproximación desde la nutrición animal.* (Ingeniero de alimento), Corporación Universitaria Lasallista, Caldas – Antioquia.
- Gonzalez, L. V. P., Gómez, S. P. M. y Abad, P. A. G. (2017). Aprovechamiento de residuos agroindustriales en Colombia. *RIAA*, 8, (2), 141-150
- Grembecka, M., Malinowska, E. y Szefer, P. (2007). Differentiation of market coffee and its infusions in view of their mineral composition. *Science of the Total Environment*, 383, (1-3), 59-69. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.04.031>
- Hermida, R., Carlos Hugo Departamento de Prensa UV. (2019). Café de Veracruz, el de mayor calidad en el país. *Universo*. Retrieved from <https://www.uv.mx/prensa/reportaje/cafe-de-veracruz-el-de-mayor-calidad-en-el-pais/>
- Hughes, S. R., López-Núñez, J. C., Jones, M. A., Moser, B. R., Cox, E. J., Lindquist, M., Galindo-Leva, L. A., Riaño-Herrera, N. M., et al. (2014). Sustainable conversion of coffee and other crop wastes to biofuels and bioproducts using coupled biochemical and thermochemical processes in a multi-stage biorefinery concept. *Applied microbiology and biotechnology*, 98, (20), 8413-8431. doi:<https://doi.org/10.1007/s00253-014-5991-1>
- ICO, I. C. O. (2020). Trade Statistics Tables. Retrieved from http://www.ico.org/trade_statistics.asp
- Official methods of analysis of AOAC International, (1990).
- Janissen, B. y Huynh, T. (2018). Chemical composition and value-adding applications of coffee industry by-products: A review. *Resources, Conservation and recycling*, 128, 110-117. doi:<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.10.001>
- Jáuregui, A., S, Álvarez, Á., MC, Escamilla, P., E, Olguín Palacios, C. y Figueroa Rodríguez, K. (2017). AGROEMPRESAS FAMILIARES DE CAFE (*Coffea arabica* L.) DIFERENCIADO Y DE ESPECIALIDAD EN VERACRUZ, MEXICO: CASOS DE EXITO. *AgroProductividad*, 10, (12), 134-140 Retrieved from <https://core.ac.uk/download/pdf/249319939.pdf>
- Johar, N., Ahmad, I. y Dufresne, A. (2012). Extraction, preparation and characterization of cellulose fibres and nanocrystals from rice husk. *Industrial Crops and Products*, 37, (1), 93-99. doi:<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2011.12.016>
- Karimi, K., Shafiei, M. y Kumar, R. (2013). Progress in physical and chemical pretreatment of lignocellulosic biomass. In *Biofuel technologies* (pp. 53-96): Springer, Berlin, Heidelberg.
- Lagos, B., Elizabeth y Castro, R., Edwin. (2019). Caña de azúcar y subproductos de la agroindustria azucarera en la alimentación de rumiantes. *Agronomía Mesoamericana*, 30, (3), 917-934. doi: <https://doi.org/10.15517/am.v30i3.34668>
- Lavoine, N., Desloges, I., Dufresne, A. y Bras, J. (2012). Microfibrillated cellulose—Its barrier properties and applications in cellulosic materials: A review. *Carbohydrate polymers*, 90, (2), 735-764. doi:<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2012.05.026>
- Licitra, G., Hernandez, T. y Van Soest, P. (1996). Standardization of procedures for nitrogen fractionation of ruminant feeds. *Animal feed science and technology*, 57, (4), 347-358
- Lim, S. L., Wu, T. Y., Lim, P. N. y Shak, K. P. Y. (2015). The use of vermicompost in organic farming: overview, effects on soil and economics. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 95, (6), 1143-1156
- Lin, Y. y Tanaka, S. (2006). Ethanol fermentation from biomass resources: current state and prospects. *Applied microbiology and biotechnology*, 69, (6), 627-642. doi:<https://doi.org/10.1007/s00253-005-0229-x>

- López, G., Francisco Javier, Escamilla, P., Esteban, Zamarripa, C., Alfredo y Cruz, C., J Guillermo. (2016). Producción y calidad en variedades de café (*Coffea arabica* L.) en Veracruz, México. *Revista fitotecnia mexicana*, 39, (3), 297-304
- Luchese, C. L., Frick, J. M., Patzer, V. L., Spada, J. C. y Tessaro, I. C. (2015). Synthesis and characterization of biofilms using native and modified pinhão starch. *Food hydrocolloids*, 45, 203-210
- Majeed, K., Jawaid, M., Hassan, A., Bakar, A. A., Khalil, H. A., Salema, A. y Inuwa, I. (2013). Potential materials for food packaging from nanoclay/natural fibres filled hybrid composites. *Materials & Design*, 46, 391-410
- Mamani Mamani, G., Mamani Pati, F., Sainz Mendoza, H. y Villca Huanaco, R. (2012). Comportamiento de la lombriz roja (*Eisenia* spp.) en sistemas de vermicompostaje de residuos orgánicos. *Journal of the Selva Andina Research Society*, 3, (1), 44-54
- Maza, V., Favián y Malavé, A. (2015a). América Latina epicentro de la bioeconomía mundial caso: agroindustria del café. In: Machala: Ecuador.
- Maza, V., Favián y Malavé, A. (2015b). *América Latina epicentro de la bioeconomía mundial caso: agroindustria del café*. In M. Ecuador (Ed.), *Universidad Tecnica de Machala*. Retrieved from <http://repositorio.utmachala.edu.ec/handle/48000/6850>
- McFarlane, H. E., Döring, A. y Persson, S. (2014). The cell biology of cellulose synthesis. *Annual review of plant biology*, 65, 69-94. doi:<https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-050213-040240>
- Mejía, A. (2017). Evaluación del efecto de la incorporación de dos tipos de plásticos (biodegradable y convencional) y la actividad de lombrices en suelos arenosos en trigo (*Triticum aestivum* L.).
- Mena-Martínez, M. E., Hernández-Jabalera, A., León-Espinosa, E. B., Cruz-Monterrosa, R. G., Rayas-Amor, A. A., Díaz-Ramírez, M., Jiménez-Guzmán, J., de la Lama, G. C. M., et al. (2019). Biopolímeros de celulosa en empaques alimenticios: Retos y aplicaciones. *AgroProductividad*, 12, (11), 83-89
- Meza, R., Paola Nathali. (2016). *Elaboración de bioplásticos a partir de almidón residual obtenido de peladoras de papa y determinación de su biodegradabilidad a nivel de laboratorio*. (Ingeniero Ambiental), Universidad Nacional Agraria La Molina Lima - Perú. Retrieved from <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/2016>
- Morales. (2014). *Caracterización de películas, elaboradas a partir de harina de quinua (Chenopodium quinoa, Willd), almidón modificado de yuca (Manihot esculenta) y montmorillonita*. Quito, 2014.,
- Morales, R., V. (2018). CARACTERIZACIÓN QUÍMICA Y NUTRIMENTAL DE LA PULPA DE CAFÉ (*Coffea arabica* L.). *Agro Productividad*, 11, (4) Retrieved from <http://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/261>
- Moreno Toasa, G. A. (2015). *Utilización de harina de plátano (musa balbisiana), en el desarrollo de películas biodegradables activas*. Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos ... ,
- Mosier, N., Wyman, C., Dale, B., Elander, R., Lee, Y., Holtzapple, M. y Ladisch, M. (2005). Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass. *Bioresource technology*, 96, (6), 673-686. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.06.025>
- Murthy, P. S. y Naidu, M. M. (2012). Sustainable management of coffee industry by-products and value addition—A review. *Resources, Conservation and recycling*, 66, 45-58. doi:<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.06.005>

- Mussatto, S. I., Ballesteros, L. F., Martins, S. y Teixeira, J. A. (2012). Use of agro-industrial wastes in solid-state fermentation processes. In BoD – Books on Demand (Ed.), *Industrial waste* (Vol. 274). Portugal.
- Mussatto, S. I., Machado, E. M., Martins, S. y Teixeira, J. A. (2011). Production, composition, and application of coffee and its industrial residues. *Food and Bioprocess Technology*, 4, (5), 661. doi:<https://doi.org/10.1007/s11947-011-0565-z>
- Navarro, S., Perla Xochitl y Alvarez, Z., Juan y Quecholac, P., Perez, X. y. V., Valdemar, M. y., Villavicencio, R. y. y Alethia, M. y. V. (2019). *Degradación & Biodegradación de Plásticos RESUMEN EJECUTIVO*. In. doi:<http://doi.org/10.13140/RG.2.2.21504.48642>
- Niaounakis, M. (2013). *Biopolymers: reuse, recycling, and disposal*. In William Andrew (Series Ed.), P. D. Library (Ed.), *PDL Handbook*.
- Nigam, P. S.-N. y Pandey, A. (2009). *Biotechnology for agro-industrial residues utilisation: utilisation of agro-residues*. In Springer Science & Business Media (Series Ed.), A. P. Poonam Singh-Nee Nigam (Ed.), (pp. 466).
- Ojeda, B., Sara. (2019). MANEJO DE RESIDUOS SÓLIDOS EN MÉXICO. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 35, 7-9. doi:<http://dx.doi.org/10.20937/RICA.2019.35.esp02.01>
- Olivares, L. Y. L. y García, N. M. (2019). Producción de azúcar a partir de sorgo dulce; una alternativa ambiental y económica para la agroindustria mexicana. *Revista Ingeniantes*, 1, (2)
- Ortega, C., Mariangela Brigitte. (2019). *Elaboración de bioplástico a partir de paja y residuos de granos de arroz*. (Ingeniería Industrial), Universidad Tecnológica del Perú, Arequipa – Perú. Retrieved from <http://repositorio.utp.edu.pe/handle/UTP/2810>
- Ortega Toro, R. (2017). Desarrollo de materiales biodegradables a base de almidón: Valorización de residuos agroindustriales Lignocelulósicos.
- Paspuel, A. E. (2016). Caracterización de un bioplástico de almidones de maíz y yuca con antocianinas de repollo morado (Brassica oleracea) como potencial indicador de pH.
- Pérez, J. G. (2014). La industria del plástico en México y el mundo. *Comercio exterior*, 64, (5), 6 Retrieved from revistas.bancomext.gob.mx
- Pérez Sánchez, S. L. (2017). Agroindustria de la caña de azúcar en Veracruz: Análisis del deterioro productivo. In E. F. F. Pérez, L. Godínez R. Salazar (Ed.), *Ciencias de la Economía y Agronomía*. Texcoco de Mora, Mexico, 2017: ECORFAN.
- Postigo, M., Raul Gustavo. (2019). *Análisis y uso de productos alternativos a base de maíz y cascara de arroz para el proceso de envases biodegradables*. (Ingeniería Industrial), Universidad Católica San Pablo, Arequipa.
- Quiñonez, A. (2015). *Obtención de un polímero biodegradable a partir de almidón de maíz*. In Vol. 1. D. n. d. I. n. y. P. n. Social (Ed.).
- Ramalakshmi, K. y Raghavan, B. (2003). Coffee: a perspective on processing and products. *HANDBOOK of postharvest technology; cereals, fruits, vegetables, tea and spices..*
- Ramírez, J., Javier. (2017). La reproducción social de los campesinos cañeros en el valle de Izúcar, Puebla, México. *Caravelle. Cahiers du monde hispanique et luso-brésilien*, (109), 77-89. doi:<https://doi.org/10.4000/caravelle.2468>
- Riera, M. A. y Palma, R. R. (2018). Obtención de bioplásticos a partir de desechos agrícolas. Una revisión de las potencialidades en Ecuador. *Avances en Química*, 13, (3), 69-78
- Rimac, L., Ana Cecilia. (2019). *Bioplásticos*. (BACHILLER EN INGENIERA AMBIENTAL), Universidad Científica del Sur, Lima – Perú. Retrieved from <https://hdl.handle.net/20.500.12805/806>

- Roa, M. (2003). Potencialidad del café y sus residuos rurales como cultivo energético Colombia. *Cenicafé. Disciplina Ingeniería Agrícola*. 2p,
- Rodríguez Cuesta, A. (2012). Biodegradabilidad de materiales bioplásticos. *Ciencia y Tecnología de Alimentos*. doi:<https://www.researchgate.net/publication/328676031>
- Rodríguez, O. V. y Páez, Y. F. (2019). Caracterización y uso de los residuos sólidos generados por empresas del sector Metalmeccánico en la Ciudad de Manizales. *Revista Luna Azul*, 48, 90-108. doi:<http://dx.doi.org/10.17151/luaz.2019.48.5>
- Roussos, S., De los Angeles Aquiahuatl, M., del Refugio Trejo-Hernández, M., Perraud, I. G., Favela, E., Ramakrishna, M., Raimbault, M. y Viniegra-González, G. (1995). Biotechnological management of coffee pulp— isolation, screening, characterization, selection of caffeine-degrading fungi and natural microflora present in coffee pulp and husk. *Applied microbiology and biotechnology*, 42, (5), 756-762. doi:<https://doi.org/10.1007/BF00171958>
- Ruiz, M., Pastor, K. y Acevedo, A. (2013). Biodegradabilidad de artículos desechables en un sistema de composta con lombriz. *Información tecnológica*, 24, (2), 47-56
- Sanchez, M. y Nava, T. M. E. (2017). *Veracruz, un analisis para el desarrollo*. In Vol. 1. E. C. d. Veracruz (Ed.), *Cafecultura en Veracruz: entre crisis y alternativas* (pp. 93-122).
- Santiago, M. S. (2015). *Elaboración y caracterización de películas biodegradables obtenidas con almidón nanoestructurado*. (MAESTRA EN CIENCIAS ALIMENTARIAS), Universidad Veracruzana Xalapa de Enríquez, Veracruz, México. Retrieved from <http://cdigital.uv.mx/handle/123456789/1001>
- Sartika, M., Lubis, M., Harahp, M., Afrida, E. y Ginting, M. (2018). Production of Bioplastic from Avocado Seed Starch as Matrix and Microcrystalline Cellulose from Sugar Palm Fibers with Schweizer's Reagent as Solvent. *Asian Journal of Chemistry*, 30, (5). doi:<https://doi.org/10.14233/ajchem.2018.21155>
- Segura, D., Noguez, R. y Espín, G. (2007). Contaminación ambiental y bacterias productoras de plásticos biodegradables. *BioTecnología*, 14, (3), 361-372
- Shatkin, J. A., Wegner, T. H., Bilek, E. T. y Cowie, J. (2014). Market projections of cellulose nanomaterial-enabled products-Part 1: Applications. *TAPPI JOURNAL*, 13, (5), 9-16 Retrieved from <https://www.fs.usda.gov/treearch/pubs/46174>
- SIAP, S. d. I. A. y. P. (2018). *La producción de caña de azúcar supera las 55 millones de toneladas en 2018**. Mexico Retrieved from <https://www.gob.mx/siap/articulos/la-produccion-de-cana-de-azucar-supera-las-55-millones-de-toneladas-en-2018>.
- SIGVER. (2020). *REPORTE FINAL POR INGENIO DE PRODUCCIÓN DE CAÑA DE AZÚCAR Y ZAFRA 2019-2020*.
- Siqueira, G., Bras, J. y Dufresne, A. (2010). Cellulosic bionanocomposites: a review of preparation, properties and applications. *Polymers*, 2, (4), 728-765. doi:<https://doi.org/10.3390/polym2040728>
- Soriano Ortega, B. (2020). Biodegradación de plásticos en ambientes naturales.
- Steiger, D., Nagai, C., Moore, P., Morden, C., Osgood, R. y Ming, R. (2002). AFLP analysis of genetic diversity within and among *Coffea arabica* cultivars. *Theoretical and applied genetics*, 105, (2-3), 209-215. doi:<https://doi.org/10.1007/s00122-002-0939-8>
- Suárez, A., Lida Dayanna. (2018). *Aprovechamiento agroindustrial de la pulpa y cascara del café (coffea arábica) variedad caturra en el noroccidente de Pichincha*. Quito: Universidad de las Américas, 2018, Retrieved from <http://dspace.udla.edu.ec/handle/33000/10317>

- Sung, S. H., Chang, Y. y Han, J. (2017). Development of polylactic acid nanocomposite films reinforced with cellulose nanocrystals derived from coffee silverskin. *Carbohydrate polymers*, 169, 495-503
- Tabil, L., Adapa, P. y Kashaninejad, M. (2011). Biomass feedstock pre-processing-part 1: pre-treatment. In M. A. D. S. Bernardes (Ed.). *BoD – Books on Demand (Series Ed.)*, Biofuel's Engineering Process Technology (Vol. 18, pp. 411-439).
- Toala, L., María Fernanda y Sarmiento, G., Vianney Varinia. (2019a). *Aprovechamiento de los residuos de café (Coffea arabica) y maíz (Zea mays) para la elaboración de bolsas biodegradables*, ESPAM MFL. Calceta: ESPAM MFL,
- Toala, L., María Fernanda y Sarmiento, G., Vianney Varinia. (2019b). *Aprovechamiento de los residuos de café (Coffea arabica) y maíz (Zea mays) para la elaboración de bolsas biodegradables*, ESPAM MFL. (INGENIERO EN MEDIO AMBIENTE), ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA AGROPECUARIA DE MANABÍ MANUEL FÉLIX LÓPEZ, CALCETA. Retrieved from <http://repositorio.espam.edu.ec/handle/42000/1194>
- Torres, C., María Angélica. (2019). *Obtención de celulosa a partir de la cáscara de cacao ecuatoriano (Theobroma cacao l.) mediante hidrólisis térmica para la elaboración de pulpa de papel*. (Ingeniería Química), Universidad Central del Ecuador QUITO. Retrieved from <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/19765>
- Vargas, L. y Alvarado, P. (2013). Caracterización del subproducto cascarilla de arroz en búsqueda de posibles aplicaciones como materia prima en procesos. *Revista Científica de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia*, 23, (1), 86-101
- Vasquez, N. B. (2017). *Factibilidad de la obtencion de celulosa a partir de los residuos provenientes de la trilla del cafe*. (Ingeniería Química), Fundación Universidad de América Bogotá Colombia
- Vázquez Rodríguez, G. A. y Beltrán Hernández, R. I. (2004). Pruebas normalizadas para la evaluación de la biodegradabilidad de sustancias químicas. Una revisión. *Interciencia*, 29, (10), 568-573
- Vega, C. A., Brizuela, N. Y. M., Togo, J. S. S. y Rodríguez, M. V. (2019). Revalorización de los residuos agroindustriales. In Universidad Juárez del Estado de Durango (Ed.), *Cadenas de valor e innovación* (pp. 304).
- Villegas Cornelio, V. M. y Laines Canepa, J. R. (2017). Vermicompostaje: I avances y estrategias en el tratamiento de residuos sólidos orgánicos. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 8, (2), 393-406
- Wang, J., Gardner, D. J., Stark, N. M., Bousfield, D. W., Tajvidi, M. y Cai, Z. (2018). Moisture and oxygen barrier properties of cellulose nanomaterial-based films. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 6, (1), 49-70
- Wisniak, J. (2005). Anselme Payen. *Educación química*, 16, (4), 568-581. doi:<http://dx.doi.org/10.22201/fq.18708404e.2005.4.66095>
- Xu, Q., Ji, T., Gao, S.-J., Yang, Z. y Wu, N. (2019). Characteristics and applications of sugar cane bagasse ash waste in cementitious materials. *Materials*, 12, (1), 39. doi:<https://doi.org/10.3390/ma12010039>
- Zossi, B., Cárdenas, G. J., Sorol, N. E. S. Q. d. P. A. y Sastre, M. E. S. Q. d. P. A. (2010). Influencia de compuestos azúcares y no azúcares en la calidad industrial de caña de azúcar en Tucumán (R. Argentina): Parte 1: caña limpia y despuntada. *Revista industrial y agrícola de Tucumán*, Retrieved from <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=AR2010F00003>