



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS
ESCUELA DE ESTUDIOS SUPERIORES DE XALOSTOC

**ELABORACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE
PELÍCULAS PLÁSTICAS A PARTIR DE POLÍMEROS
BIODEGRADABLES**

TESIS

Para obtener el título de:

INGENIERO QUÍMICO

Presenta:

JOCELYN SOTO GONZÁLEZ

Director: Dr. José Luis Gadea Pacheco
Codirectora: Dra. Angeluz Olvera Velona

Ayala, Morelos.

Marzo, 2020.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



Ayala, Morelos a 11 de marzo del 2021.

DRA. JOSEFINA VERGARA SÁNCHEZ
DIRECTORA DE LA EESX
P R E S E N T E

Por medio del presente, los revisores de la tesis que lleva por título "ELABORACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE PELÍCULAS PLÁSTICAS A PARTIR DE POLÍMEROS BIODEGRADABLES" que ha realizado la pasante de la Licenciatura en **Ingeniería Química, Jocelyn Soto González**, otorgamos nuestro voto de aprobación para su impresión por haberse realizado las correcciones consideradas pertinentes de nuestra parte.

Atentamente
Por una humanidad culta
Una universidad de excelencia

Dr. José Luis Gadea Pacheco

Dra. Angeluz Olvera Velona

Dra. Yessica Flor Cervantes Adame

Dr. César Torres Segundo

M.C.I. Lucrecia Díaz Flores

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril de 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

JOSE LUIS GADEA PACHECO | Fecha: 2021-03-16 13:10:45 | Firmante

levDmctjogcL3Oe+eTyDDA2cay4jxv14jittNhYgP0bSw1KDyBoTBSmsjX97HLYJRN5SZywkPwVaS10V55quM/Lho3jwW+0tpSJwk5c+vB9Fp60INyn041WArfVABfvZjFP2h+4GS5NkPBeXVpYwjtSYfe6+FNFjFnD65qHJL0Db7SDkISQ6nSCKtIEPH66ZJYHZjS9hmun2vx+8u7Co+SLrqOZcXVdngRavgMidVYd+sNmLEEEmXtVILTCoKWHFxA8grRytVfQMCLLlTMHLguJv6ngovYMGqFGK8mWl8pVH5p6QldnWNpau/y7+7dCmdu0EXkMyk+ZzZT+5cviZj2uJsQ==

ANGELUZ OLVERA VELONA | Fecha: 2021-03-16 13:52:46 | Firmante

SQ0uS6vu0Hkv2B10KSsfaHx3ZymFsyZPCOWFNikSm6Q14I8WQvg4y9gyghAJeT71KkrDyvrvoVG/Ud03cLOGchGQ/NAp6Ua4691Ye5ksKqas+ejpUXcEZ8g80NfrgN72Cj63QpKAh59a3VM3/afz6kO+Okb6z+lp5iQYTwyCrSknjFx43ILWr+JaO9mYtt482ScChw0ZULR6jNEDSSfqMO6++oyq7THP/AGg2/iLdjzq20Wa7yoxWeS8WOafPFLvG29zAEaVcehd6kCEB8b69+d3/Okshi/MShx6SQiTOK5tLDKhs1ivQXSnLnhN2GptMAz+QtELHc82A7Kva0DQ9A==

CESAR TORRES SEGUNDO | Fecha: 2021-03-16 14:46:57 | Firmante

IJKTmaxpBMVp5wN6IP1Xm5b9SZTEaTSAIiizhMElhg/rjltcARKIDYfJkjo/yEUtQ8cQMSwktXzPc4BdSWIqemZlvhBQIA/oStWVch1u39D1Boe2Uo20bGh83EI49wnKA8rdBH6MRD76dHEsFiXBxZBdF6rPk53OAI3J8M0qO8h9Bg8qky//ISRCoNn/xfpGsfvRBL3uezArkRdvYl+LvVFPo6a2T9HSMq+lmJW//kyWWtOPEjNijY2sLcaRMajT9Vyyq4nD5LVFI3C0cyzR+j9lbtuuQvotqE3TSeTJUenKm/kWkNOROsYbfn0qu6KYydJCs1I8ogx2CUEauA==

MARIA LUCRECIA DIAZ FLORES | Fecha: 2021-03-16 16:33:45 | Firmante

QwpsZ7hKrLnmgKOb8jPOUPRqaJi8DL3NeV6YyFCMcyo/e4W3+tdb/gF8shLstcZhe6bducv0PEF9Yy/WigrpMlum4tJokYXx1xHNufJ7TL28mcNokTD8vcjuW/BhFLyL1sBDHrvW+oA+WPgQMki/pusNL1Bax+ZmYe/WXtrwJuzRNu5CzB82ZT8iU18BubyIYMRZY/+z7sowmig3Y3o6u/hwKY0zDkSL7VvRUvGwpC8rq7Jf66+HemqwpWEQafgiZWWUvpiLIgPrP795La6mDERzknH0+XtKmQD3o1erOMLbe3uBD12IICy7YI+c5bntgrlOISWV+jk3g4og==

YESSICA FLOR CERVANTES ADAME | Fecha: 2021-03-16 20:53:53 | Firmante

qH+w83NyzxwrtCi7tQuZwUZ2Sqqu8agZyiD2NwvrPHLMoyE/hnfzi1abEv2HzYlrJQtWGWVJoZhBlfKufQlfXXAuc30vN2o9Vfc0Ofcs44iClecMMktbqVgpmFBtXwuOyIExeqx78PDEHhB743XwOIoS+5velsZU0+Bn5s9z+pJHx0YX3EmYqrcSgnGGAiW3BJaLov53FOWiqTIMFX5y2nKKILCTFndxuNM7FLj/fafYI3Fdd0BgA7bGRjXU4kz/7iPhO4Zngl0v1/tf9ESIJ/qUiyJhQX85Vlx7hVvckDf8Di0SxeTu8Ujijy0CQyVt3sGEzjrTpKMI+J4vb7A==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



2sFu63

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/0tjZklHb4d1agdJy8g4yvwut2JoRpAdy>

Agradecimientos

Al creador del universo por permitirme existir, por rodearme de las personas que me han acompañado en la vida, por la felicidad y por todas las cosas que me han permitido lograr mis metas.

A mi madre por su enorme esfuerzo y amor, por siempre apoyarme y alentarme a salir adelante, por ser mi guía y contar con ella en todo momento. No tengo palabras para expresar todo lo que siento y lo agradecida que estoy de ser parte de ti, de la formación que me has dado y por prepararme en la vida. Eres lo que más amo en este mundo y espero estar para ti siempre.

A mis suegros por su gran esfuerzo, apoyo y cariño, por enseñarme a valorar la vida, por sus enseñanzas, los quiero y los admiro mucho.

A mi esposo por su apoyo, paciencia, amor y dedicación. Por tu compañía, tus consejos y tus ánimos de aprender cosas nuevas todo el tiempo.

A mis amigos por sus ocurrencias, por los buenos y malos momentos y por los recuerdos que quedaran toda la vida.

Gracias a todos ustedes por ser parte de mi vida, por su enorme esfuerzo y apoyo, pero sobre todo por su cariño y amor.

A mis profesores que siempre se mostraron en la mejor disposición de enseñarme, gracias por transmitirme sus conocimientos y formarme profesionalmente.

A mis asesores de tesis los doctores José Luis Gadea Pacheco y Ángeluz Olvera Velona, por su apoyo y esfuerzo en el trabajo, por su empeño y dedicación, gracias a ustedes por siempre estar en la mejor disposición de enseñarme y asesorarme. Gracias a la Dra. Yessica Flor Cervantes Adame por siempre tener la mejor disposición de apoyo en el laboratorio, muchas gracias por todo pero especialmente por su amistad.

A mis asesores de prácticas Sergio, Sam y Cari por su apoyo y enseñanzas.

Resumen

Un importante porcentaje de residuos sólidos urbanos se les atribuye a compuestos plásticos, considerando éstos un desecho de gran impacto para el ambiente, debido a su difícil degradación se consideran una importante fuente de contaminación.

Por ello es una prioridad buscar alternativas de materiales plásticos que no sean perjudiciales para el ambiente. Aprovechando las características que el almidón como polímero natural ofrece, y su capacidad de combinarse con diferentes compuestos, este material resulta ser una alternativa para sustituir plásticos de larga duración y difícil degradación.

En la presente investigación se elaboraron películas plásticas a partir de polímeros biodegradables, almidón de maíz (Maizena) y poli (alcohol vinílico), a diferentes concentraciones, con aditivos que mejoran sus propiedades y proceso de elaboración. Las concentraciones de los polímeros se prepararon con las siguientes relaciones: 90/10, 75/25, 60/40, 45/55 (almidón/poli (alcohol vinílico)), preparando 4 muestras por duplicado (A, B, C y D).

Una vez elaboradas las películas plásticas se llevó a cabo el análisis de las propiedades fisicoquímicas: grosor, densidad, solubilidad y dureza. Mediante espectroscopia de infrarrojo, se verificó la variación de la concentración del almidón y el poli (alcohol vinílico).

Se llevó a cabo una prueba de degradación en suelo mediante pérdida de peso. Se demostró que las películas plásticas elaboradas tienen una alta degradabilidad en suelo en condiciones ambientales a cielo abierto.

Índice general

| | |
|---|----|
| Índice de tablas | 1 |
| Índice de figuras..... | 2 |
| 1. Introducción..... | 3 |
| 1.1. Justificación | 5 |
| 1.2. Objetivos..... | 6 |
| 1.2.1. Objetivo general..... | 6 |
| 1.2.2. Objetivos específicos..... | 6 |
| 2. Marco teórico | 7 |
| 2.1. Polímeros..... | 7 |
| 2.2. Poli (alcohol vinílico) | 8 |
| 2.3. Biopolímeros..... | 9 |
| 2.4. Bioplásticos..... | 9 |
| 2.4.1. Ventajas de bioplásticos | 10 |
| 2.4.2. Desventajas de bioplásticos | 10 |
| 2.5. Polisacáridos..... | 10 |
| 2.6. Almidón..... | 11 |
| 2.6.1. Amilosa y amilopectina | 12 |
| 2.6.2. Enlaces glucosídicos | 13 |
| 2.6.3. Gelatinización | 14 |
| 2.6.4. Transición vítrea | 14 |
| 2.6.5. Usos del almidón como bioplástico..... | 15 |
| 2.7. Maíz (<i>Zea mays</i> , L.)..... | 15 |
| 2.7.1. Estructura del grano de maíz..... | 15 |
| 2.7.2. El maíz y su almidón..... | 17 |
| 2.8 Propiedades físico- químicas de polímeros | 18 |
| 2.9 Degradabilidad..... | 20 |
| 3. Materiales y métodos | 22 |
| 3.1. Reactivos | 22 |
| 3.1.1. Reactivos primarios | 24 |
| 3.1.2. Reactivos secundarios..... | 24 |
| 3.2. Equipo..... | 25 |

| | |
|--|----|
| 3.3. Procedimiento de la elaboración de las películas plásticas..... | 26 |
| 3.3.1. Silanizado | 26 |
| 3.3.2. Proceso de elaboración de las películas plásticas | 26 |
| 3.4. Caracterización físico- química de las películas plásticas | 29 |
| 3.4.1. Grosor..... | 29 |
| 3.4.2. Densidad | 29 |
| 3.4.3. Porcentaje de solubilidad..... | 29 |
| 3.4.4. Dureza | 30 |
| 3.4.5. Espectrofotometría de Infrarrojo por Transformadas de Fourier..... | 30 |
| 3.5. Prueba de degradabilidad..... | 31 |
| 4. Resultados y discusión..... | 32 |
| 4.1. Películas plásticas | 32 |
| 4.2. Caracterización físico-química de las películas plásticas | 33 |
| 4.2.1. Grosor..... | 33 |
| 4.2.2. Densidad | 33 |
| 4.2.3. Solubilidad | 34 |
| 4.2.4. Dureza | 35 |
| 4.2.5 Caracterización por espectroscopia de infrarrojo por transformadas de Fourier..... | 36 |
| 4.3. Prueba de degradabilidad en suelo por pérdida de peso..... | 44 |
| 5. Conclusiones..... | 46 |
| 6. Bibliografía | 47 |
| Anexos | 51 |

Índice de tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Clasificación de los materiales poliméricos. | 7 |
| Tabla 2. Composición y características del grano de maíz. | 16 |
| Tabla 3. Ventajas y desventajas del almidón de maíz como biopolímero. | 17 |
| Tabla 4. Proporción de almidón y poli (alcohol vinílico). | 24 |
| Tabla 5. Reactivos empleados en la elaboración de las películas plásticas. | 24 |
| Tabla 6. Equipo y especificaciones. | 25 |
| Tabla 7. Materiales empleados en el proceso de silanizado. | 26 |
| Tabla 8. Condiciones de tiempo y temperatura durante el proceso de elaboración | 28 |
| Tabla 9. Grosor promedio de cada muestra. | 33 |
| Tabla 10. Densidad de cada muestra | 34 |
| Tabla 11. Porcentaje de materia seca | 34 |
| Tabla 12. Porcentaje de solubilidad de las películas plásticas | 35 |
| Tabla 13. Dureza de las películas plásticas en escala Shore. | 35 |
| Tabla 14. Pérdida de peso de las películas plásticas. | 44 |
| Tabla 15. Humedad en la prueba de degradabilidad | 51 |
| Tabla 16. Peso de las muestras en la prueba de degradabilidad..... | 51 |

Índice de figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1. Estructura molecular del poli (alcohol vinílico). | 8 |
| Figura 2. Amilosa [Wade, 2012]. | 12 |
| Figura 3. Amilopectina [Wade, 2012]. | 13 |
| Figura 4. Estructura de los granos dentados y vítreos típicos de maíz. | 16 |
| Figura 5. Mazorcas de maíz que muestran las etapas de línea de almidón [Endicott, S., 2014]. | 17 |
| Figura 6. Diagrama del proceso de elaboración de las películas plásticas. | 27 |
| Figura 7. Películas plásticas elaboradas a diferentes concentraciones de almidón/ poli (alcohol vinílico)..... | 32 |
| Figura 8. Espectroscopia de infrarrojo de la muestra A (90/10), Almidón/ Poli (alcohol vinílico). | 36 |
| Figura 9. Espectroscopia de FTIR. Muestra A (90/10), Almidón/Poli (alcohol vinílico), todas con la misma línea de base. | 37 |
| Figura 10. Espectroscopia de infrarrojo de la muestra B (75/25), Almidón/Poli (alcohol vinílico). | 38 |
| Figura 11. Espectroscopia de FTIR. Muestra B (75/25), Almidón/Poli (alcohol vinílico), todas con la misma línea de base. | 39 |
| Figura 12. Espectroscopia de infrarrojo de la muestra C (60/40), Almidón/Poli (alcohol vinílico). | 40 |
| Figura 13. Espectroscopia de FTIR. Muestra C (60/40), Almidón/Poli (alcohol vinílico), todas con la misma línea de base. | 41 |
| Figura 14. Espectroscopia de infrarrojo de la muestra D (45/55), Almidón /Poli (alcohol vinílico). | 42 |
| Figura 15. Espectroscopia de FTIR. Muestra D (45/55), Almidón/Poli (alcohol vinílico), todas con la misma línea de base. | 42 |
| Figura 16. Espectro de FTIR de todas las películas A, B, C y D. Todas en una misma línea de base. | 43 |
| Figura 17. Gráfica pérdida de peso muestra A, B, C y D | 45 |

1. Introducción

En la actualidad las sociedades están en constante búsqueda y mejoramiento de materiales que hagan más cómoda la vida. Uno de los materiales más importantes, por sus usos variados y aplicaciones sin duda es el plástico, convirtiéndose actualmente en un material indispensable. Éste ha sido desarrollado y mejorado, obteniendo importantes usos en muchas áreas de la ciencia, como en la medicina y en la ingeniería. Los plásticos son económicos, livianos, resistentes a la oxidación, versátiles, aislantes de la corriente eléctrica, inertes al ataque microbiano y pueden sustituir la madera, la piedra o el metal. Es por ello que se utiliza para brindar productos y servicios facilitando diversos procesos y situaciones de la vida cotidiana. A pesar de sus ventajas, el uso irracional de los plásticos ha traído consecuencias que afectan a los ecosistemas. Siendo éstos altamente resistentes a la corrosión, al agua y a la descomposición bacteriana, se convierten en residuos difíciles de eliminar, permaneciendo en el ambiente por mucho tiempo, lo que conlleva a una acumulación y en consecuencia a causar graves problemas de contaminación.

La disposición final de los materiales plásticos elaborados a partir del petróleo ha generado problemas ambientales de gran significancia ya que generalmente se desechan sin ninguna clasificación, incluso en 2018 el lema del Día Mundial del Medio Ambiente fue: “Un planeta Sin Contaminación por Plástico”, con la finalidad de hacer conciencia sobre el cambio de hábitos en el consumo de plásticos de un solo uso. Es por ello que la sociedad actual busca alternativas que logren sustituir productos a base de materiales petroquímicos por unos que sean más amigables con el ambiente.

Una de las alternativas es la utilización de polímeros naturales, materiales que interactúan con el ambiente sin perjudicar y se degradan mucho más rápido que los plásticos derivados del petróleo. Actualmente existe investigación sobre el almidón, el cual se considera un polímero natural, económico y abundante, puede obtenerse a partir de distintas fuentes como maíz, papa o yuca. El almidón es uno de los

polímeros más prometedores para la elaboración de películas biodegradables que puedan reemplazar productos plásticos a base de petroquímicos.

Sin embargo, el almidón por sí solo es menos resistente y tiene propiedades mecánicas pobres, es por esto que diversas investigaciones se enfocan en mejorar estas características. Para mejorar las propiedades del almidón, es común someterlo a modificaciones, tanto químicas como físicas, agregando aditivos que mejoran dichas propiedades y mantienen la inocuidad del producto. La adición de poli (alcohol vinílico) ha sido estudiada debido a que se considera un polímero biodegradable y mejora las propiedades mecánicas. Ante lo expuesto esta investigación tiene como propósito elaborar películas plásticas a partir de dos polímeros biodegradables almidón de maíz (Maizena) y poli (alcohol vinílico).

1.1. Justificación

En México, el año 2012, según cifras de SEMARNAT, un 10.9 % de los residuos sólidos urbanos (RSU) generados se les atribuyó a compuestos plásticos. Considerando éstos, un desecho de gran impacto para el ambiente. Los plásticos derivados del petróleo son compuestos poliméricos constituidos por largas cadenas de átomos que contienen carbono e hidrógeno, son de difícil degradación y permanecen en el ambiente por mucho tiempo, generando una importante fuente de contaminación. En México se han propuesto Leyes que prohíben el uso de ciertos productos plásticos, esto podría significar una reducción en su demanda, también es cierto que conlleva a un riesgo para la industria productora de plástico. Por lo que es una prioridad buscar alternativas de materiales plásticos que no sean perjudiciales para el ambiente. Aprovechando las características que el almidón como polímero natural ofrece, y su capacidad de combinarse con diferentes compuestos puede resultar una alternativa para sustituir a plásticos elaborados a partir del petróleo.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Elaborar y caracterizar películas plásticas a partir de polímeros biodegradables, almidón de maíz y poli (alcohol vinílico).

1.2.2. Objetivos específicos

1. Elaborar películas plásticas a partir de almidón de maíz y de poli (alcohol vinílico) a diferentes concentraciones y analizar las películas plásticas elaboradas mediante espectroscopia de Infrarrojo.
2. Analizar las características fisicoquímicas (grosor, solubilidad, peso, densidad y dureza) de las películas plásticas elaboradas.
3. Realizar prueba de degradabilidad mediante pérdida de peso en suelo.

2. Marco teórico

2.1. Polímeros

Según la IUPAC (Unión internacional de química pura y aplicada, por sus siglas en inglés) un polímero es una sustancia compuesta por macromoléculas. El término polímero proviene del griego (*poly*: mucho y *mero*: partes). Haciendo referencia a su conformación la cual es la repetición de múltiples unidades de monómeros, que son moléculas de menor tamaño y por lo tanto menor masa molecular [García, 2014, Calvo, 2013].

Un polímero puede ser de origen sintético o natural. Actualmente, por lo general, se recurre a la síntesis de materiales poliméricos a base de petroquímicos. En la tabla 1 se muestra la clasificación de materiales poliméricos:

Tabla 1. Clasificación de los materiales poliméricos.

| Bases | Tipo |
|-------------------|--|
| Origen | Natural, sintético, semisintético |
| Respuesta térmica | Termoestables, termoplásticos |
| Formación | Adición, condensación |
| Estructura | Lineales, ramificados, entrecruzados |
| Aplicaciones | Fibras, plásticos, elásticos |
| Tacticidad | Isotácticos, sindiotácticos, atácticos |

2.2. Poli (alcohol vinílico)

Polímero altamente polar, hidrosoluble y biocompatible. Usado como protector en reacciones de polimerización y como aditivo para polímeros, la síntesis de poli (alcohol vinílico) es una aplicación de importancia del poli acetato de vinilo, el cual, es uno de los polímeros que presenta gran producción debido a sus diversas aplicaciones como adhesivo, base para pinturas y componentes para acabados arquitectónicos, entre otros [Perilla, 1998].

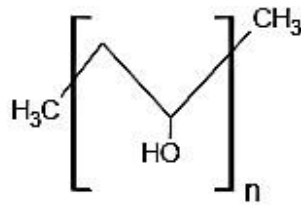


Figura 1. Estructura molecular del poli (alcohol vinílico).

La estructura del alcohol polivinílico se muestra en la figura 1. Éste tiene la posibilidad de formar puentes de hidrógeno inter e intramolecular, haciendo que el poli (alcohol vinílico) tenga una fracción cristalina importante. La existencia de estos enlaces de hidrógeno implica también que posea un comportamiento mecánico apto para la fabricación de fibras sintéticas, que además de tener una alta resistencia, tendrían la capacidad de difundir agua rápidamente [Perilla, 1998].

Se ha reportado que la naturaleza hidrofilia del poli (alcohol vinílico) favorece la compatibilidad con otros materiales biodegradables, confiriendo de esta manera un medio de soporte estable para la formulación de materiales termoplásticos. Es un material ampliamente utilizado en aplicaciones de empaques, biotecnología y biomédica debido a su amplia versatilidad, buenas propiedades de barrera, flexibilidad, facilidad de procesabilidad y baja toxicidad [Encalada, 2015] [Rescignano, 2014].

Algunos usos que actualmente se le han conferido al poli(alcohol vinílico) son hidrogeles en aplicaciones médicas de bajas exigencias mecánicas, por ejemplo,

se ha sintetizado y caracterizado hidrogel de poli(alcohol vinílico) evaluando las propiedades de tracción y variando la concentración de poli(alcohol vinílico), encontrando que a mayor concentración se alberga menos cantidad de agua debido a que existe mayor densidad de entrecruzamiento dejando menos volumen disponible para el hinchamiento de hidrogeles, por lo que se puede incrementar su resistencia mecánica aumentando la concentración de poli(alcohol vinílico) [Echeverri, 2009].

2.3. Biopolímeros

Macromoléculas (incluidas proteínas, ácidos nucleicos y polisacáridos) formados por organismos vivos [IUPAC, 1992].

Los biopolímeros son macromoléculas presentes en los seres vivos. Una definición de estos los considera materiales poliméricos o macromoleculares sintetizados por los seres vivos [García, 2015].

Los biopolímeros se dividen en aquellos basados en recursos renovables y degradables que cumplen todos los criterios de las normas científicamente reconocidas para biodegradabilidad y compostaje de plásticos y productos plásticos [Valero, 2013].

En general los biopolímeros son considerados como aquellos en los que para conformarse participan seres vivos, y se dividen en tres principales familias: proteínas, ácidos nucleicos y polisacáridos, el almidón pertenece a esta última.

2.4. Bioplásticos

Son polímeros elaborados a partir de materias primas naturales renovables como almidón, caña de azúcar, celulosa, etc. son biodegradados por microorganismos como bacterias, hongos y algas. Así mismo forman parte de una alternativa para

disminuir la contaminación al medio ambiente ocasionada por plásticos sintéticos [CONADESUCA, 2016].

2.4.1. Ventajas de bioplásticos

El beneficio que los bioplásticos podrían llegar a generar es bastante alto, a continuación, se mencionan algunas de sus ventajas:

- Reduce la generación de residuos plásticos tradicionales.
- Son procesables mediante técnicas tradicionales, usando procesos y tecnologías existentes.
- Son amigables con el ambiente.
- Son considerados como una alternativa para sustitución de plásticos de larga duración.

2.4.2. Desventajas de bioplásticos

El coste de producción de un polímero biodegradable es superior al de producción de un plástico derivado del petróleo. Además de que las propiedades mecánicas de los polímeros biodegradables son inferiores a las de los plásticos típicos, presentando menor resistencia física [Labeaga, 2018].

2.5. Polisacáridos

Son compuestos formados por muchas unidades (moléculas) de monosacáridos. Estas unidades se mantienen unidas por enlaces glucosídicos que pueden romperse por hidrólisis, al igual que los disacáridos [Morrison, 1998].

El almidón y la celulosa son los polisacáridos más importantes. Ambos se producen en vegetales por medio del proceso de fotosíntesis a partir de dióxido de carbono y

agua, los dos están constituidos por unidades de D-(+)-glucosa. La celulosa es el principal material de los vegetales, confiriéndoles rigidez y forma. Es probablemente la materia orgánica de mayor distribución. El almidón es la reserva alimenticia de los vegetales, y se haya especialmente en sus semillas. Tiene mayor solubilidad en agua que la celulosa, se hidroliza con mayor facilidad y por lo tanto es más digerible.

2.6. Almidón

El almidón por lo general se encuentra en forma de gránulos y tienen el tamaño y la forma característicos de la planta de la cual se obtiene. Cuando están intactos los gránulos son insolubles en agua fría; si se rompe su membrana externa al ser molidos, estos gránulos se hinchan con el agua fría formando un gel. Cuando se tratan de gránulos enteros con agua tibia, esta se difunde a través de sus membranas y extrae una parte de almidón. En agua caliente se hinchan al extremo que revientan [Morrison, 1998].

Las moléculas de almidón se almacenan en las semillas de los vegetales que lo producen, sirviendo de fuente de energía y alimento para el desarrollo de un vegetal nuevo.

El almidón es uno de los biopolímeros más prometedores, por lo que ha atraído interés como una alternativa a plásticos convencionales. El uso del almidón promueve la sostenibilidad y aborda el impacto negativo que los plásticos no biodegradables causan en el medio ambiente [Sanyang, 2015].

Propiedades del almidón, tales como su resistencia mecánica y flexibilidad, dependen del carácter de la región cristalina, la cual se relaciona con la proporción amilosa: amilopectina, la distribución del peso molecular, del grado de ramificación y el proceso de conformación [García, 2015].

La interacción del almidón con componentes como polialcoholes y ácido cítrico disminuyen la absorción de agua en el almidón lo cual evita que el material se vuelva frágil. [Villada, 2008].

2.6.1. Amilosa y amilopectina

El almidón es una mezcla de dos polisacáridos: amilosa (con un peso molecular de entre 0.1 y 1 millón de g/mol) y amilopectina (peso molecular de entre 10,000 a 1,000 millones g/mol), ambos formados por unidades de glucosa. La primera posee una estructura cristalina y generalmente se encuentra en un 20%, mientras que la otra se presenta en un 80% y se caracteriza por tener una estructura amorfa que está formada por regiones ramificadas de amilopectina y amilosa. Una de las propiedades más importantes del almidón es su semicristalinidad donde la amilosa es el componente dominante para la cristalización en los almidones [García, 2015 y Palacios, 2012].

- Amilosa

Es un polímero lineal de la glucosa, soluble en agua, con enlaces glucosídicos α 1,4. En la figura 2 se muestra una estructura parcial de la amilosa y la posición de dicho enlace [Wade, 2012].

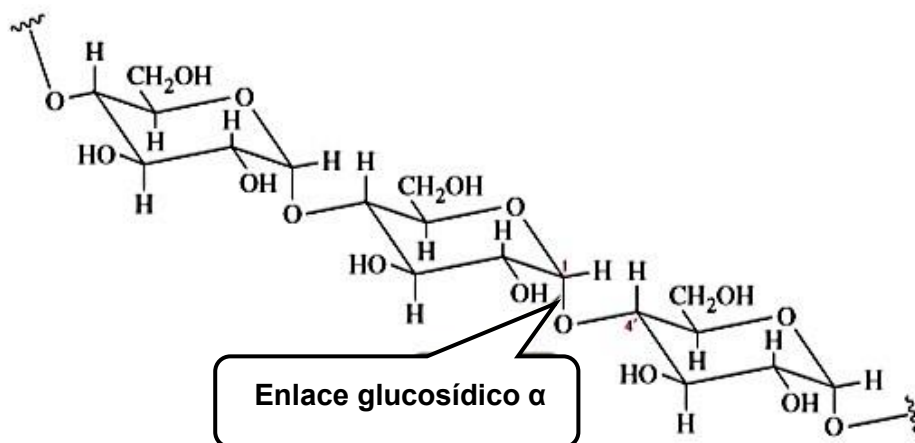


Figura 2. Amilosa [Wade, 2012].

- Amilopectina

Polímero α -1,4 de la glucosa, con un punto de ramificación aproximadamente cada 20 a 30 unidades de glucosa, por medio de un enlace glicosídico α -1,6. En la figura 3 se muestra una estructura parcial de la amilopectina, incluyendo un punto de ramificación [Wade, 2012].

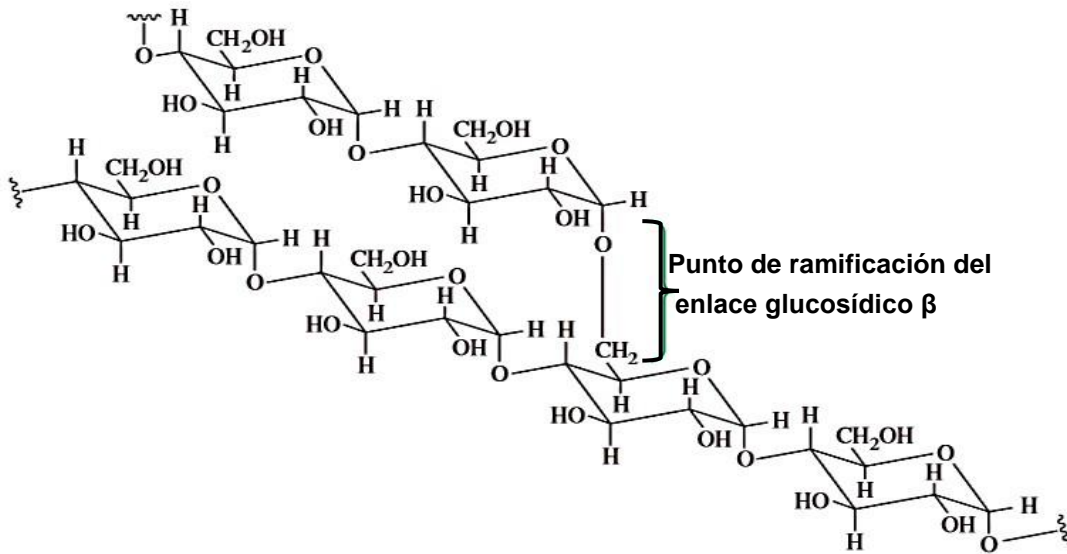


Figura 3. Amilopectina [Wade, 2012].

Las moléculas de amilopectina son significativamente más grandes que las moléculas de amilosa; algunas contienen entre 10,000 y 20 millones de unidades de glucosa.

2.6.2. Enlaces glicosídicos

Los enlaces glicosídicos unen las moléculas de glucosa de la cadena principal de la amilopectina. Con frecuencia se encuentran ramificaciones de la cadena principal,

las cuales se deben a los enlaces glicosídicos $\alpha - 1,6$ con otras moléculas de glucosa [García, 2015].

2.6.3. Gelatinización

Es el proceso en el cual los granos de almidón pierden su cristalinidad en presencia de calor y agua. En suspensión acuosa los granos se hinchan por la acción del calor, tienden a perder las propiedades que le confiere su estructura semicristalina y a una temperatura crítica forman un gel [García, 2015].

2.6.4. Transición vítrea

La temperatura de transición vítrea se encuentra dentro de las propiedades termodinámicas de segundo orden. Como se sabe las de primer orden son aquellas como la ebullición, condensación o la fusión, las cuales suceden cuando un sistema absorbe o desprende calor. Sin embargo las de segundo orden son transiciones que no tienen un calor latente asociado [Palacios, 2012].

Al no tener un calor latente, significa que no cambia de fase, simplemente cambian al pasar de un estado gomoso a uno vítreo (más estable). Generando una temperatura de transición vítrea (T_g) propia de cada componente y también de la proporción en que se encuentren dentro de una mezcla. Ese cambio de estado amorfo desordenado a un vítreo, se le conoce como transición vítrea [Gutiérrez, 2014].

Además, se ha asumido que los productos amorfos son estables en su estado sólido, vítreo, por debajo de la T_g , con una alta viscosidad interna. Al aumentarse el contenido de agua, crece la movilidad de las moléculas y la T_g disminuye [Rodríguez, 2011, Gutiérrez, 2014].

2.6.5. Usos del almidón como bioplástico

Se ha utilizado almidón por su abundancia, bajos costos de producción y gracias a su biodegradabilidad. Es una fuente renovable que satisface aspectos de disponibilidad, biocompatibilidad, comestibilidad y propiedades funcionales [Ramos, 2018, Valencia, 2013].

Se ha empleado en films para envasado, film de uso agrícola, bolsas de compra o basura, en recubrimientos totalmente compatibles con alimentos manteniendo frutas y verduras frescas. Conservando el valor nutrimental y manteniendo la firmeza [AIMPLAS, 2015; Ramaraj, B., 2016].

2.7. Maíz (*Zea mays*, L.)

El maíz es la planta más domesticada y evolucionada del reino vegetal. El origen y la evolución del maíz es un misterio, debido a que ha llegado a nosotros altamente evolucionado, sin que se conozcan formas intermedias [Asturias, M., 2004].

Una mazorca de maíz tiene de 500 a 800 granos, según las prácticas de producción y ambiente favorable. El peso medio del grano con un 15.5% de humedad es de aproximadamente 350 mg, con un rango de 200 a 400mg [Endicott, S., 2014].

2.7.1. Estructura del grano de maíz

El grano de maíz tradicional está compuesto por un 70 a 75% de almidón, 8 a 10% de proteína y 4 a 5% de aceite, contenidos en tres estructuras: el germen (embrión), el endospermo y el pericarpio. El germen constituye el 10 al 12% del peso seco y contiene el 83% de los lípidos y el 26% de la proteína del grano y el endospermo constituye el 80% del peso seco y contiene el 98% del almidón y el 9% de proteínas. El pericarpio constituye el 5 al 6% del peso seco e incluye todos los tejidos de

cobertura exterior, con un 100 % de fibras vegetales. En la figura 4 se muestran las partes por las cuales se compone el grano de maíz, cuando es vítreo y dentado [Álvarez, A., 2006].

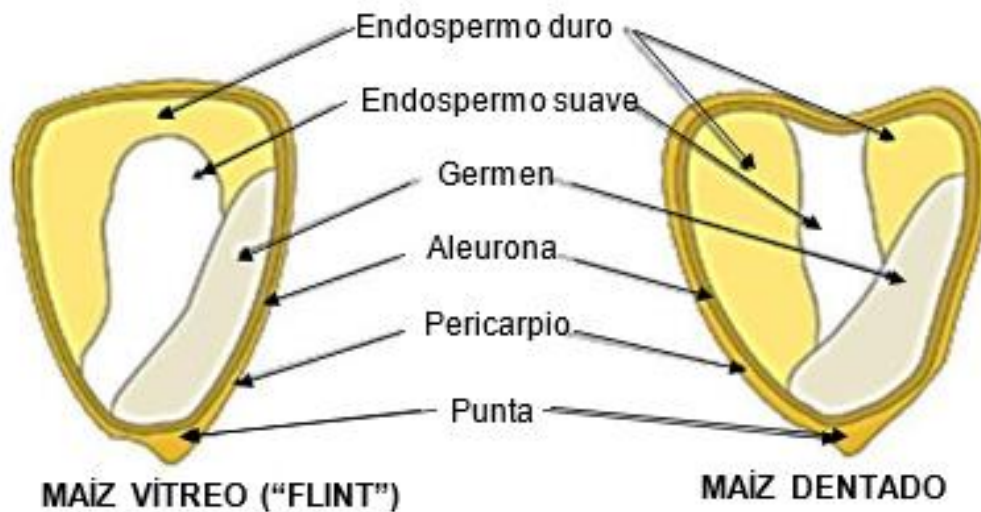


Figura 4. Estructura de los granos dentados y vítreos típicos de maíz.

Fuente: [Endicott, S., 2014].

En la tabla 2 se muestra una comparación de la composición y características del grano de maíz.

Tabla 2. Composición y características del grano de maíz.

| Lípidos (%) | Proteínas (%) | Rango de diámetros (µm) | Diámetro promedio (µm) | Forma del grano |
|-------------|---------------|-------------------------|------------------------|--------------------|
| 0.8 | 0.35 | 2-30 | 10 | Redonda, poligonal |

2.7.2. El maíz y su almidón

Se forma una línea lechosa, que crea una separación entre el almidón duro y el almidón blando, llamada línea de almidón. Su generación tiene lugar en la corona del grano y avanza hacia la base, o punta del grano, lo que normalmente toma alrededor de tres a cuatro semanas, tal como se muestra en la figura 5, la línea comienza en la corona del grano y avanza hacia la punta del grano [Endicott, S., 2014].



Figura 5. Mazorcas de maíz que muestran las etapas de línea de almidón [Endicott, S., 2014].

En la tabla 3 se muestran las ventajas y desventajas del almidón de maíz como biopolímero.

Tabla 3. Ventajas y desventajas del almidón de maíz como biopolímero.

| Ventajas | Desventajas |
|--|------------------------------|
| Compostable y biodegradable | Baja resistencia térmica |
| Buena procesabilidad. Por ejemplo; inyección o extrusión | Sensible a la humedad |
| Resistente a grasas | Propiedades mecánicas pobres |
| Abundancia | |
| Bajos costos | |

2.8 Propiedades físico- químicas de polímeros.

Cuando se trata de polímeros, sus posibles aplicaciones dependen de sus propiedades, es por ello que se suelen evaluar propiedades físicas, químicas y mecánicas, debido a que de éstas dependen sus características.

Grosor

Se define como grosor a la distancia perpendicular entre dos superficies, el material que formará la muestra es un parámetro importante para la elaboración de películas plásticas.

Densidad

La densidad es una característica importante en los bioplásticos debido a la disminución de costos al utilizar menor cantidad de material. El producto tendría menor peso y beneficiaría sus condiciones de comercialización [Navia, 2014].

Solubilidad

Es la propiedad de formar una solución de una sustancia con otra. Se define como la capacidad que tiene una determinada sustancia de disolverse en otra, expresado como la proporción de disolución de la primera sustancia en la segunda. Generalmente los polisacáridos son altamente higroscópicos y se desintegran rápidamente en agua. [Muñoz, 2014]

Dureza

Se define como una evaluación que permite determinar la resistencia de un material a la deformación permanente mediante la penetración de otro material más duro. Se consigue evaluar las propiedades de un material, tales como su fuerza, ductilidad y resistencia al desgaste. Una evaluación de dureza ayuda a determinar si un material o el tratamiento de un material son adecuados para el propósito deseado [Struers Ensuring Certainty, 2019].

La dureza puede determinarse mediante un instrumento llamado durómetro, los hay de diferentes tipos y en distintas unidades de medida. Uno de los más usados son los durómetros portátiles, los cuales son instrumentos para medir en el lugar provistos de un reloj reglado y un indentador, que registra la fuerza o el tamaño de la huella en la superficie del material. Suele ocuparse para medir materiales blandos como los plásticos, madera, textiles y algunos metales y aleaciones no ferrosas como el paladio, el aluminio, el zinc y el estaño. La medición de la dureza, en este tipo de instrumentos, suele realizarse en escala Shore [Metal Actual, 2015].

Espectro infrarrojo por transformadas de Fourier

La espectroscopia infrarroja es un método en el que se estudia la absorción o emisión de energía radiante originada por la interacción entre la radiación electromagnética y el material de estudio [Piqué, 2012].

El principio de la espectroscopia de IR se basa en que las moléculas tienen la posibilidad de rotar y vibrar a distintas frecuencias, en un espectro infrarrojo se puede manifestar prácticamente todos los compuestos moleculares, cada compuesto tendrá un comportamiento particular frente a un haz de infrarrojos. Cuando se hace un análisis IR se mide la intensidad de haz antes y después de que interaccione con la muestra [Piqué, 2012].

2.9 Degradabilidad

La degradación es un proceso irreversible que conduce a un cambio significativo y permanente en la estructura del material a su vez la pérdida de propiedades y/o fragmentación [AIMPLAS, 2011].

La velocidad de degradación depende de varios factores tales como espesor de la muestra, humedad, temperatura, oxígeno, entre otros [CIT, 2007].

Entre los criterios de diseño compatibles con el medio ambiente se encuentran los polímeros biodegradables para películas y envases. Estos polímeros tienen origen en materias orgánicas, como el almidón, de ahí el concepto de plásticos biodegradables o bioplásticos [Rodríguez, 2007].

Se ha desarrollado otro tipo de plástico sintético degradable; es un plástico basado en alcohol polivinílico con estructura parecida al polietileno. La presencia de grupos hidroxilo en este polímero lo hacen hidrofílico y por tanto, soluble en agua. Por último, el cuarto tipo de plásticos son los completamente degradables naturales, estos sufren la degradación del material por medio de microorganismos hasta llegar a dióxido de carbono.

La biodegradación es la capacidad de un material para ser degradado, por acción natural de microorganismos (hongos, bacterias, algas), obteniendo de manera progresiva una estructura más simple. Es importante considerar que esta reacción de descomposición ocurre en un periodo corto [AMPLIAS, 2011].

Según Stevens se aceptan éstos mecanismos de degradación:

1. Fotodegradación por luz natural
2. Termo degradación
3. Degradación mecánica
4. Oxidación por aditivos químicos
5. Biodegradación por microorganismos

La pérdida de peso de una muestra a lo largo de un período de degradación también se encuentra registrada como un indicador de la degradabilidad de un polímero [Rodríguez, 2007].

- Determinación de la degradabilidad

El proceso de degradación de un polímero se puede llevar a cabo en diversos ambientes, dependiendo de dónde finalice la vida útil del producto (suelo, composta, relleno o el mar).

Existen procedimientos que permiten comprobar la degradabilidad. El envase debe degradarse al menos en un 90 % en seis meses en donde la desintegración, se comprueba si el material es capaz de degradarse físicamente, hasta fragmentos de tamaño menor de 2 mm [Pascual C., 2011].

3. Materiales y métodos

Para la elaboración de películas plásticas a partir de polímeros biodegradables, es necesario aportar diferentes reactivos a la mezcla, y garantizar ciertas condiciones que permitan su obtención.

3.1. Reactivos

- Almidón de maíz

Se utilizó almidón de maíz de la marca comercial (Maizena), debido a que es económico y fácil de conseguir.

- Poli (alcohol vinílico)

Con la finalidad de mejorar las propiedades mecánicas, como la resistencia al agua, mayor flexibilidad y resistencia al rompimiento, se utilizó un polímero sintético el poli (alcohol vinílico).

- Glicerina ($C_3H_8O_3$)

Se utilizó glicerina como agente suavizante para mejorar la flexibilidad de las películas plásticas.

- Aceite de soya

Se utilizó aceite de soya de la marca Nutrioli, como lubricante para la manejabilidad a la mezcla y evitar que se adhiera a los moldes en la elaboración de las películas plásticas.

- Ácido bórico (H_3BO_3)

Se empleó ácido bórico, marca Golden Bell, el cual actúa como agente modificador en el almidón debido a que aumenta la tensión, le confiere también una capa protectora ante productos fúngicos ya que al ser un bioplástico tiene mayor susceptibilidad a las bacterias y hongos. [Ramos, 2018] [Holguin, 2019].

- Estearato de Magnesio ($Mg(C_{18}H_{35}O_2)_2$)

Se utilizó como desmoldante, éste se recomienda a la hora de procesar el material en los equipos para que no se adhiera a las paredes, la marca del reactivo es Alfa Aesar con una pureza del 99%.

- Cloruro de Sodio (NaCl)

Se utilizó para mejorar propiedades como la transparencia, y la resistencia al esfuerzo cortante. Se usó la marca Químicos de Monterrey.

- Etanol al 98%

Este es el precursor de la polimerización de la mezcla, el cual se debe adicionar de forma lenta y progresiva, también mejora la transparencia del biopolímero.

- Agua

Se utilizó agua destilada para el procesamiento de las películas plásticas.

3.1.1. Reactivos primarios

Son los reactivos, almidón y poli (alcohol vinílico), que se emplearon para la elaboración de las películas plásticas se realizaron cuatro muestras a diferentes concentraciones. En la tabla 4 se presenta la proporción de cada uno de estos reactivos.

Tabla 4. Proporción de almidón y poli (alcohol vinílico).

| Muestra | | Reactivos | |
|---------|----------------|-------------|-----------------------------|
| | Proporción (%) | Almidón (g) | Poli (alcohol vinílico) (g) |
| A | 90/10 | 5.85 | 0.65 |
| B | 75/25 | 4.9 | 1.63 |
| C | 60/40 | 3.9 | 2.6 |
| D | 45/55 | 2.9 | 3.6 |

3.1.2. Reactivos secundarios

Son aquellos reactivos que durante la elaboración de las películas plásticas siempre se requirió de la misma cantidad de reactivo. En la tabla 5 se muestran los reactivos y la cantidad utilizada en la elaboración de las películas.

Tabla 5. Reactivos empleados en la elaboración de las películas plásticas.

| Reactivo | Cantidad |
|----------------|----------|
| Glicerina | 1.19 mL |
| Aceite de soya | 0.75mL |
| Ácido bórico | 0.075 g |
| Etanol | 6.25 mL |
| Agua destilada | 20 mL |
| NaCl | 0.375 g |

3.2. Equipo

El equipo empleado en la elaboración de las películas plásticas y sus especificaciones se muestra en la tabla 6.

Tabla 6. *Equipo y especificaciones.*

| Cantidad | Equipo | Especificaciones |
|-----------------|---------------------|-------------------------|
| 1 | Termoagitador | 120 °C \pm 1 |
| 1 | Agitador Magnético | Grande |
| 1 | Vaso de precipitado | 100 mL |
| 1 | Varilla de vidrio | 30 cm |
| 1 | Espátula | Acanalada |
| 3 | Vidrio de reloj | 600 mm |
| 9 | Caja Petri | 90 mm |
| 1 | Perilla | |
| 2 | Pipetas | 5 mL y 10 mL |
| 2 | Probetas | 25 mL y 10 mL |

3.3. Procedimiento de la elaboración de las películas plásticas

3.3.1. Silanizado

La preparación de las muestras se realizó en caja Petri. Para evitar que éstas se adhiriesen al vidrio se realizó un proceso de silanizado, el cual consistió en elaborar una solución de tolueno con dimetil silano al 2%, posteriormente se vertió en un cristalizador grande y se sumergió cada una de las tapas de caja Petri por aproximadamente un minuto, se dejan secar cinco minutos y por último se enjuagaron con agua destilada; en la tabla 7 se muestran los materiales empleados para esta parte del procedimiento.

Tabla 7. *Materiales empleados en el proceso de silanizado.*

| Cantidad | Material | Especificaciones |
|-----------------|-----------------|-------------------------|
| 1 | Cristalizador | 1 litro |
| 8 | caja Petri | Vidrio |
| 1 | Pinza | Metálica |
| 1 | Jeringa | 5 mL |
| 1 | Piseta | 500 mL |

3.3.2. Proceso de elaboración de las películas plásticas

Se realizó el proceso de elaboración de las películas plásticas de acuerdo con el procedimiento mostrado en la figura 6.

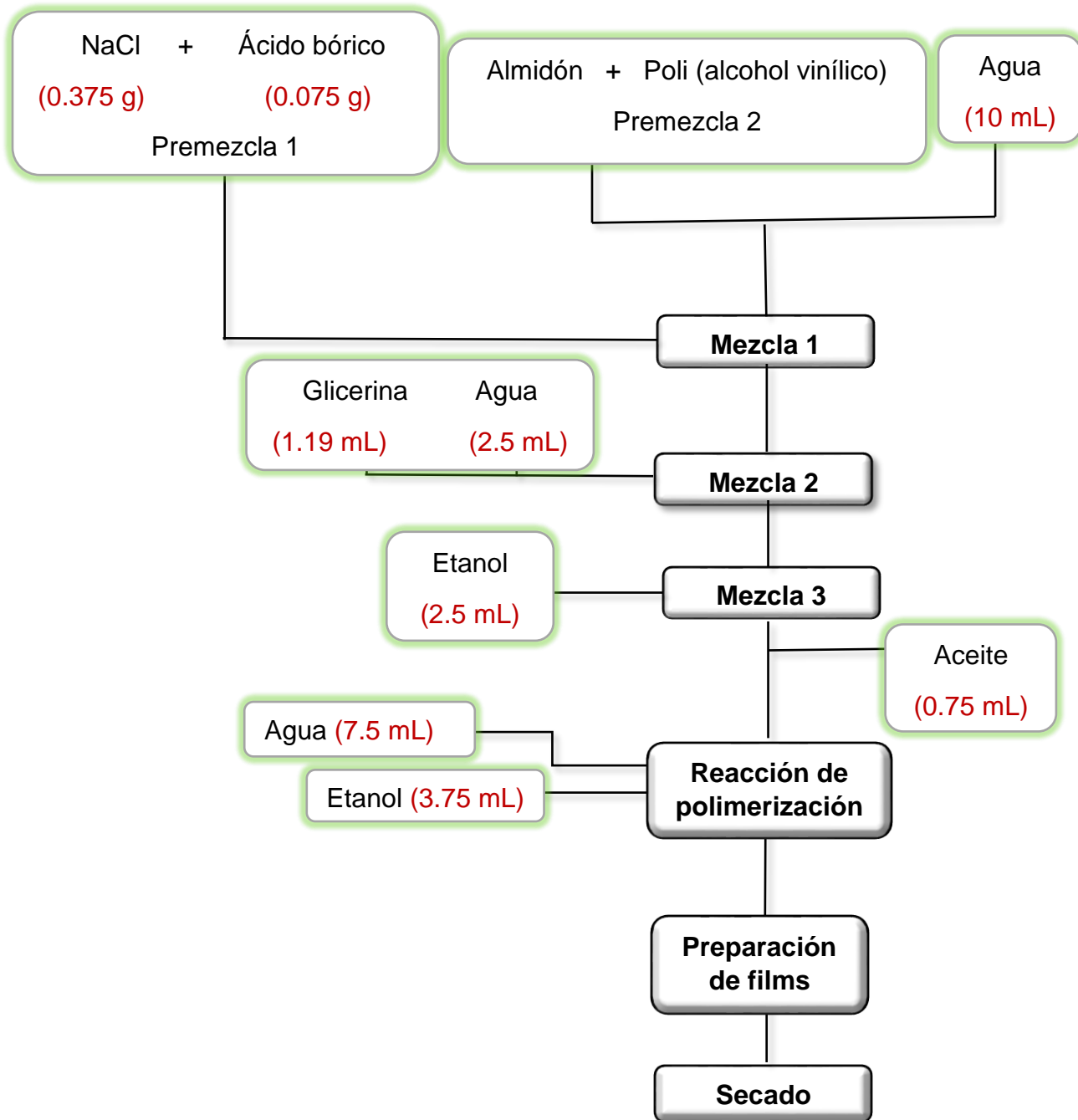


Figura 6. Diagrama del proceso de elaboración de las películas plásticas.

Nota. El proceso de elaboración de las películas se llevó a cabo en condiciones de agitación suave y constante en todo el proceso.

Las condiciones de tiempo y temperatura de elaboración de las películas plásticas se muestran en la tabla 8.

Tabla 8. Condiciones de tiempo y temperatura durante el proceso de elaboración.

| Etapa | t (min) | T (°C) |
|----------------------------|-----------------|---------------------------------|
| Premezcla | 5 | 40 |
| Mezcla 1 | 5 | 40 |
| Mezcla 2 | 5 | 40 |
| Mezcla 3 | 5 | 40 |
| Reacción de polimerización | 10 | 70-80 |
| Preparación de films | | 25 ± 1 |
| Secado | 1 semana | 20-25 (Temperatura ambiente) |

3.4. Caracterización físico- química de las películas plásticas

3.4.1. Grosor

Fue medido con un micrómetro (Electronic Digital Micrometer, 0.25mm-0.001mm) en cinco puntos diferentes de cada muestra. Se obtuvo un valor promedio del grosor de cada una de las películas.

3.4.2. Densidad

Este parámetro fue calculado como la relación entre el peso y el volumen medida a $25 \pm 1^\circ\text{C}$, en muestras de 3 cm de largo, 3 cm de ancho y el espesor de cada muestra. El peso fue obtenido mediante balanza analítica marca OHAUS, modelo PA42022C.

3.4.3. Porcentaje de solubilidad

Para determinar el porcentaje de solubilidad primero se calculó el porcentaje de materia seca presente, para ello se pesó 0.1 gramos de cada muestra en una charola de aluminio y se secó a 120°C por 24 horas para determinar el % de materia seca, mediante la siguiente fórmula:

$$\% \text{ materia seca} = \frac{\textit{peso final}}{\textit{peso inicial}} * 100$$

Posteriormente en vasos de precipitados de 50 mL, se agregó 0.1 gramos de cada uno de los plásticos, y se adicionaron 30 mL de agua destilada. Se mantuvieron a 25°C por 24 horas con ligera agitación de forma ocasional. Se recuperó la parte insoluble y se secó a 150° por 24 horas. El % de solubilidad determinó mediante la siguiente fórmula:

$$\% \text{ solubilidad} = \frac{\textit{peso seco inicial} - \textit{peso final}}{\textit{peso seco inicial}} * 100$$

Donde el peso seco inicial se obtiene de multiplicar el peso inicial por el % de materia seca previamente calculado.

3.4.4. Dureza

La dureza se determinó con un durómetro digital Shore D tomando en cuenta las siguientes especificaciones:

- El penetrador deberá estar en posición perpendicular respecto a la superficie sometida al ensayo.
- El área debe permanecer con una iluminación constante.
- Será necesario recalibrar/verificar el durómetro cada vez que se realice una nueva medición.

3.4.5. Espectrofotometría de Infrarrojo por Transformadas de Fourier

Se analizó cada una de las muestras, así como cada reactivo utilizado. En un espectrofotómetro Bruker Alpha – FTIR, en donde se obtuvieron los espectros de infrarrojo.

La metodología consistió en limpiar con alcohol isopropílico la superficie de la placa de cuarzo antes de colocar la muestra, se hace un barrido para ajustar el equipo de infrarrojo, al término se depositó una porción pequeña de la muestra, se ajusta el equipo y automáticamente se realiza el espectro.

3.5. Prueba de degradabilidad

Esta prueba se realizó en un microcosmos de suelo agrícola, en condiciones ambientales no controladas, mediante pérdida de peso.

Microcosmos de suelo: Se utilizó 500 g de suelo agrícola de la Escuela de Estudios Superiores de Xalostoc, municipio de Ayala, Morelos, con un valor de pH 6 y porcentaje de humedad 1.2 %.

Se cortaron cuadros de 3 x-3 cm, de las películas plásticas elaboradas, se pesaron en una balanza analítica marca OHAUS, modelo PA42022C y se registró el peso inicial. Posteriormente se colocaron en los microcosmos de suelo a una profundidad de 5 cm a condiciones del ambiente. Las muestras se recuperaron a los 3, 5, 8,10, 14, 23 y 31 días de exposición, con la ayuda de un pincel se limpiaron para quitar el exceso de suelo y se pesaron. Como control se utilizó polietileno de baja densidad (PEBD comercial). Esta prueba se realizó por duplicado en el mes de abril de 2019.

4. Resultados y discusión

4.1. Películas plásticas

En la figura 7 se muestran las películas plásticas elaboradas a las diferentes proporciones de reactivos primarios. La fotografía A presenta una textura rugosa y un tanto quebradiza, la B presenta una textura más lisa y uniforme respecto a la A y pocos grumos y burbujas al tacto. La C presenta flexibilidad, textura uniforme y menos grumos que A y B la D tiene una textura rugosa, es flexible al tacto, presenta grumos.

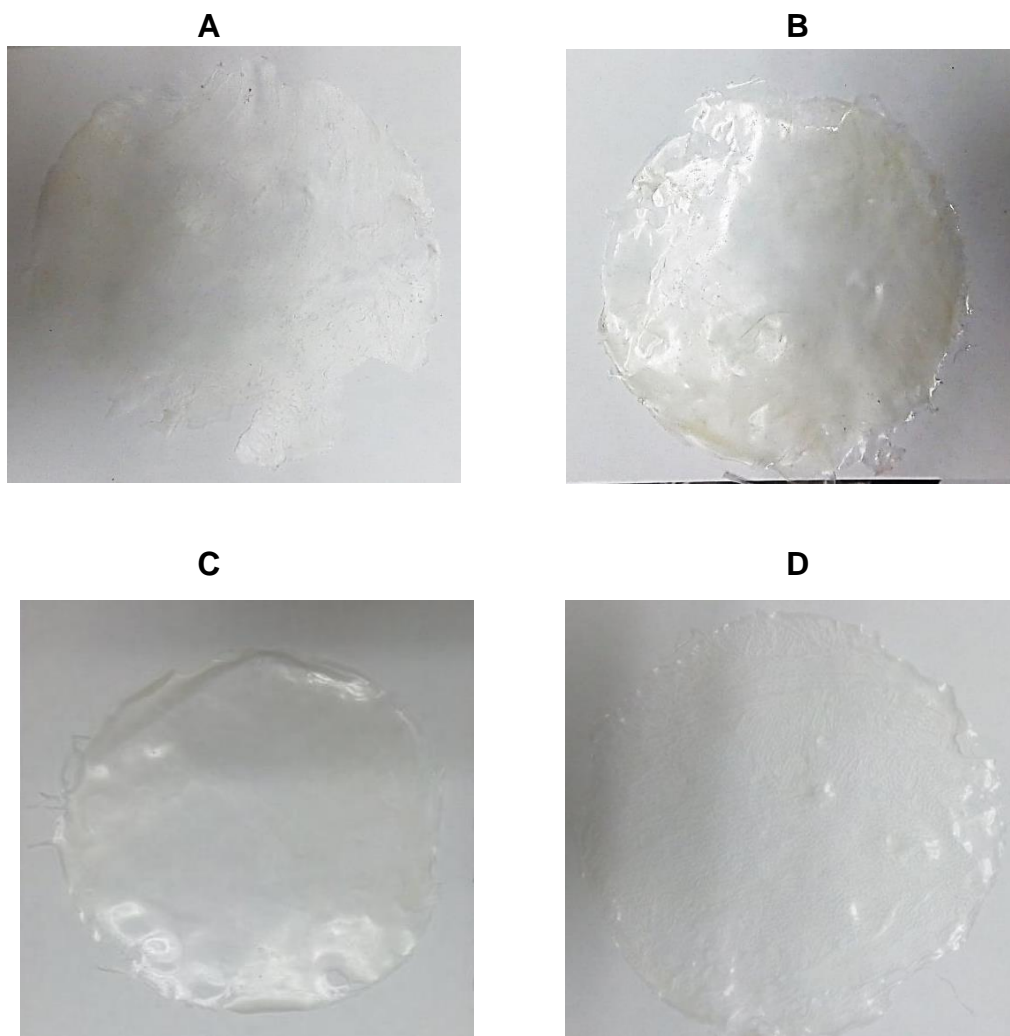


Figura 7. Películas plásticas elaboradas a diferentes concentraciones de almidón/ poli (alcohol vinílico).

De las cuatro películas plásticas elaboradas con biopolímeros la película C, a la vista y tacto fue la que presento mejores características.

4.2. Caracterización físico-química de las películas plásticas.

4.2.1. Grosor

Los valores que se reportan en la tabla 9 fueron obtenidos a partir de mediciones en cinco puntos distintos de las películas y de los cuales se obtuvo un promedio entre cada una de ellas. El grosor fue similar entre las películas (muestra A, muestra B, muestra C y muestra D). Se sabe que el espesor siempre tendrá una variación, además también depende del método de elaboración utilizado.

Tabla 9. Grosor promedio de cada muestra.

| Repetición | Muestra A (mm) | Muestra B (mm) | Muestra C (mm) | Muestra D (mm) |
|------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 1 | 0.198 | 0.147 | 0.157 | 0.168 |
| 2 | 0.191 | 0.130 | 0.156 | 0.158 |
| 3 | 0.123 | 0.129 | 0.149 | 0.168 |
| 4 | 0.180 | 0.187 | 0.122 | 0.134 |
| 5 | 0.155 | 0.161 | 0.181 | 0.151 |
| Promedio | 0.169 | 0.150 | 0.153 | 0.156 |

4.2.2. Densidad

En la tabla 10 se muestran los resultados obtenidos de la densidad, a partir de dos repeticiones, para cada una de las muestras de películas de almidón / poli (alcohol vinílico). Como se puede observar, existe poca variación entre los datos de una repetición y otra, se considera que la técnica para la elaboración de las películas

fue adecuada. Las muestras A y D presentaron una densidad similar con poca variación respecto a las muestras B y C. La muestra C obtuvo el valor más alto de densidad. La muestra B presentó menor densidad.

Tabla 10. Densidad de cada muestra.

| | Muestra A | Muestra B | Muestra C | Muestra D |
|------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1 | 0.788 | 0.66 | 0.871 | 0.713 |
| 2 | 0.722 | 0.66 | 0.871 | 0.856 |
| Densidad (g/cm³) | 0.755 | 0.66 | 0.871 | 0.784 |

4.2.3. Solubilidad.

En la tabla 11 se presenta el porcentaje de materia seca, factor importante para calcular el porcentaje de solubilidad de las muestras.

Tabla 11. Porcentaje de materia seca.

| | Muestra | | | |
|--------------------------|---------|--------|--------|--------|
| | A | B | C | D |
| Peso inicial (g) | 0.1088 | 0.1023 | 0.1058 | 0.1031 |
| Peso final (g) | 0.0985 | 0.0937 | 0.0962 | 0.094 |
| % de materia seca | 90.5 | 91.5 | 90.9 | 91.1 |

En la tabla 12 se muestran los porcentajes de solubilidad de las películas, como se puede observar todas las muestras presentan un valor alto de solubilidad (> a 99%) esto es debido a que los dos polímeros que forman las películas plásticas tienen altos índices de solubilidad.

Tabla 12. Porcentaje de solubilidad de las películas plásticas.

| | Muestra | | | |
|-------------------|---------|---------|---------|---------|
| | A | B | C | D |
| Peso seco inicial | 9.8499 | 9.3699 | 9.6199 | 9.3999 |
| Peso final | 0.0188 | 0.0002 | 0.0112 | 0.0018 |
| % de solubilidad | 99.810 | 99.9988 | 99.8845 | 99.9818 |

4.2.4. Dureza

La dureza obtenida en las muestras es buena en comparación con la dureza del polietileno de baja densidad que va de 41-46 en escala Shore. En la tabla 13 se exhibe la muestra que presentó mayor dureza (muestra B), la cual contiene una proporción de 75/25 (almidón, poli (alcohol vinílico)). La muestra que presenta menor dureza es la A, la cual también tiene menor cantidad de poli (alcohol vinílico). Se obtuvo un valor intermedio, respecto a la muestra A Y B, en las muestras C (60/40) y D (45/55) ((almidón/ poli (alcohol vinílico))), con valores de 37.33 y 35.67, respectivamente. Esto indica que una concentración de 60/40 presenta una dureza más alta respecto a la concentración 45/55.

La dureza fue superior a la determinada en biopolímeros en la investigación de Rosales, 2016, la cual fue de 9 a 14 y similar a la de Meneses, 2007, la cual está en un rango de 31.17 a 49.99.

Tabla 13. Dureza de las películas plásticas en escala Shore.

| Repetición | Muestra | | | |
|----------------------|---------|----|-------|-------|
| | A | B | C | D |
| 1 | 32 | 42 | 35 | 36 |
| 2 | 36 | 38 | 39 | 39 |
| 3 | 33 | 43 | 38 | 32 |
| Dureza(Shore) | 33.67 | 41 | 37.33 | 35.67 |

4.2.5 Caracterización por espectroscopia de infrarrojo por transformadas de Fourier

Caracterización de Muestra A

En la figura 8 se presentan los espectros de FTIR de la muestra A, cuya relación de almidón y poli (alcohol vinílico) es de 90/10 % en P/P, como se puede observar hay señales características de cada uno de los reactivos presentes en la película. En la región de 1700 cm^{-1} se encuentra el grupo carbonilo ($-\text{COOH}$) presente en el poli (alcohol vinílico) y no en el almidón. Sin embargo, la señal se hace presente en la película (muestra A) esto es debido a que forma parte de la composición de la misma. La presencia del grupo carbonilo en el poli (alcohol vinílico) es debido a que en la hidrolisis del poli (acetato de vinilo) para obtener poli (alcohol vinílico) es muy difícil de eliminarlo al 100%. También la vibración del grupo hidroxilo ($-\text{OH}$) suele aparecer como una banda ancha cuyo máximo puede encontrarse entre $3400\text{-}3300\text{ cm}^{-1}$ presente en mayor intensidad en el poli (alcohol vinílico) que en el almidón esto es ocasionado muy probablemente a la diferencia de pesos moleculares entre ellos y se aprecia en la película con mayor intensidad que el almidón.

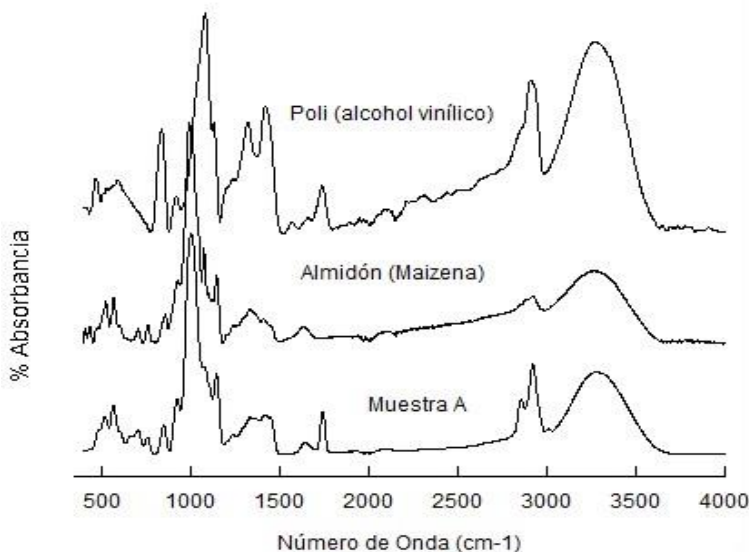


Figura 8. Espectroscopia de infrarrojo de la muestra A (90/10), Almidón/ Poli (alcohol vinílico).

En la figura 9 se muestran los espectros de IR de todas las películas plásticas elaboradas, se puede observar que a medida que aumenta la concentración de poli (vinil alcohol) en la película, la región en el espectro entre 3100 a 3600 cm^{-1} también aumenta. Esta señal es característica por la presencia de los grupos -OH que están presentes en la molécula de poli (alcohol vinílico). En la misma figura también se puede observar la variación en la región de 1700 cm^{-1} ocasionado por las vibraciones que presenta el grupo -COOH presente en la molécula del poli (alcohol vinílico) y aumentan también conforme lo hace la concentración en la película.

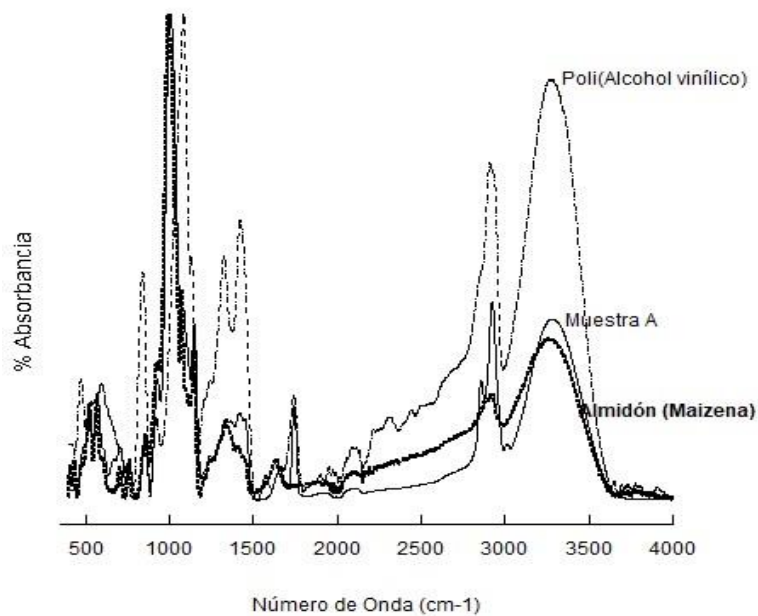


Figura 9. Espectroscopia de FTIR. Muestra A (90/10), Almidón/Poli (alcohol vinílico), todas con la misma línea de base.

Caracterización de la Muestra B

En la figura 10 se presentan los espectros de FTIR de la muestra B, cuya relación de almidón y poli (alcohol vinílico) es de 75/25 % en P/P. Como se puede observar en el espectro de FTIR existen señales en la muestra que combinan las de los dos polímeros por separado. De igual forma como se describió en la muestra A las regiones que corresponden a las vibraciones de los grupos –OH y –C=O aparecen en mayor intensidad en la muestra B.

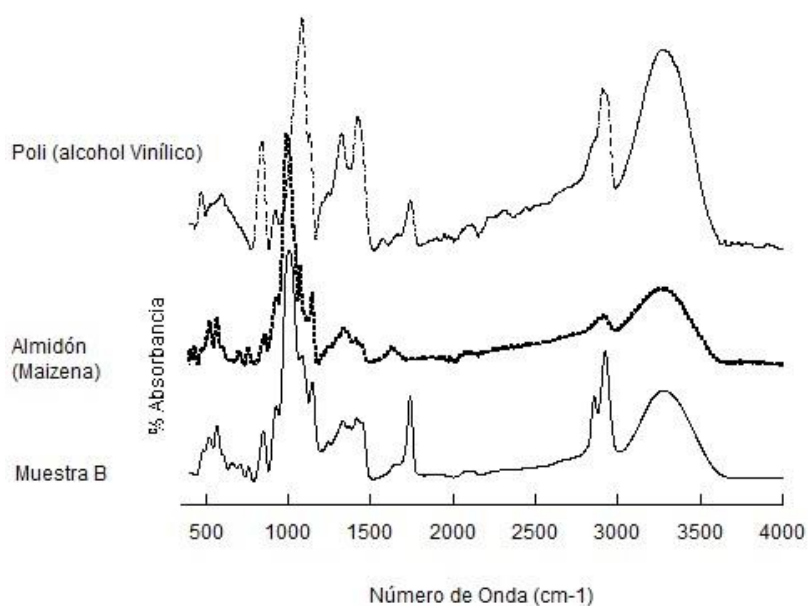


Figura 10. Espectroscopia de infrarrojo de la muestra B (75/25), Almidón/Poli (alcohol vinílico).

En la figura 11 se presentan los espectros de FTIR de la muestra B con los reactivos primarios, como se puede observar las señales que se describieron en el espectro en la figura 12 se muestran en proporción a la composición que tiene entre el almidón y el poli (alcohol vinílico), la muestra B se encuentra en una proporción intermedia.

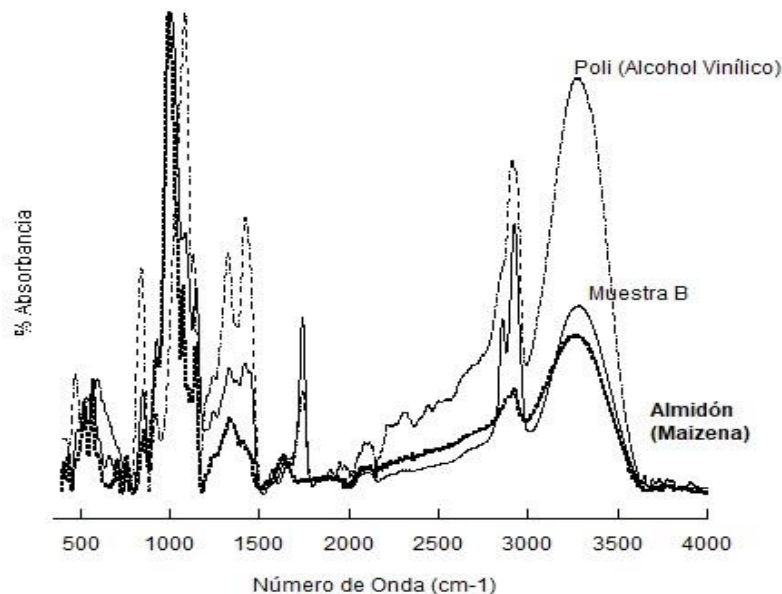


Figura 11. Espectroscopia de FTIR. Muestra B (75/25), Almidón/Poli (alcohol vinílico), todas con la misma línea de base.

Caracterización de la muestra C

En la figura 12 se presenta el espectro de la Muestra C que corresponde a una relación 60/40, en porcentaje en peso, de Almidón y Poli (alcohol vinílico) respectivamente. Como se puede observar en el espectro de la muestra C, la intensidad de la banda en la región de 3300 -3400 cm^{-1} aumenta en intensidad al compararlo con el espectro del almidón, pues en esta composición de la película aumenta el contenido de poli (alcohol vinílico) que correspondería de manera cualitativa y cuantitativa este comportamiento.

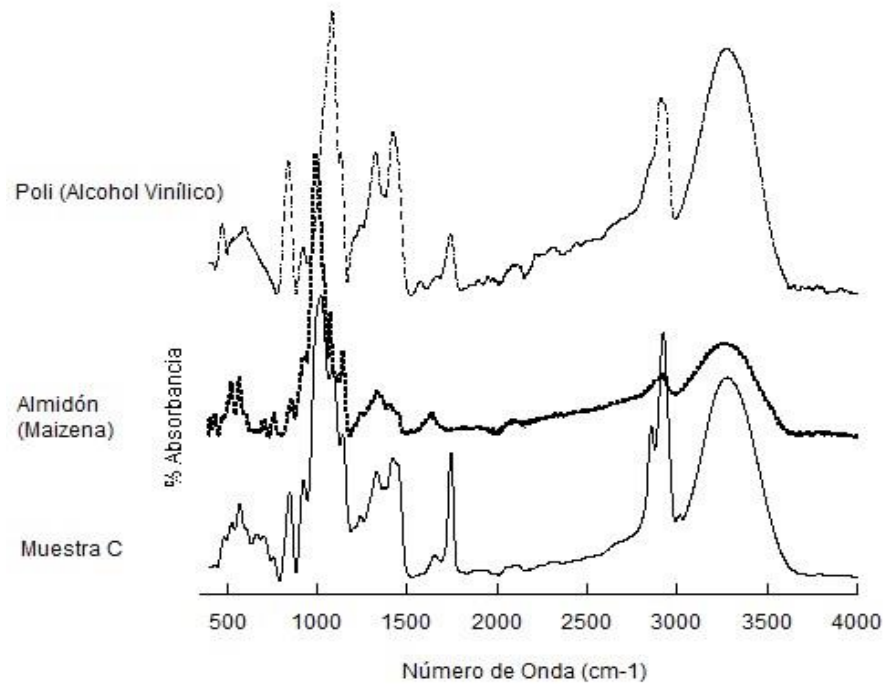


Figura 12. Espectroscopia de infrarrojo de la muestra C (60/40), Almidón/Poli (alcohol vinílico).

En la figura 13 se presentan los espectros de FTIR de la muestra C con los reactivos variantes, en esta figura se puede observar un mejor contraste entre los espectros del almidón, la muestra C y el poli (alcohol) vinílico comprobando que la composición de las películas desde su elaboración corresponde con los resultados de los espectros de IR presentados.

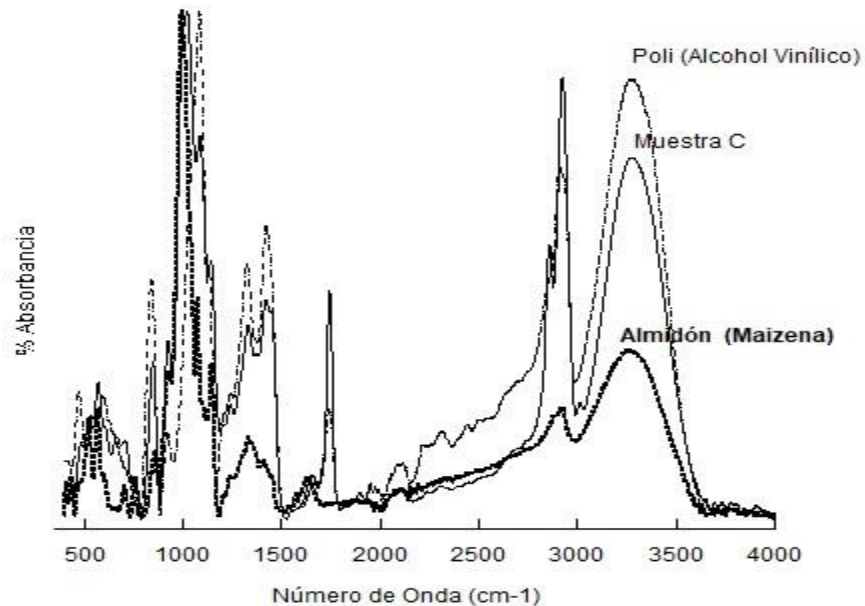


Figura 13. Espectroscopia de FTIR. Muestra C (60/40), Almidón/Poli (alcohol vinílico), todas con la misma línea de base.

Caracterización de la muestra D

En la figura 14 se presentan los espectros de IR de la muestra D con los reactivos primarios, en una relación 45/55 almidón/ poli (alcohol vinílico). Como se ha descrito en los espectros de las figuras anteriores las señales en el espectro se ven combinadas entre la muestra y los reactivos primarios. En esta figura se puede observar como el espectro de la muestra D se asemeja en intensidad al poli (alcohol vinílico) en la región que corresponde al grupo – OH. En la figura 15 se aprecia el incremento en la intensidad de las señales respecto al poli (alcohol vinílico), el cual tiene mayor concentración en esta muestra.

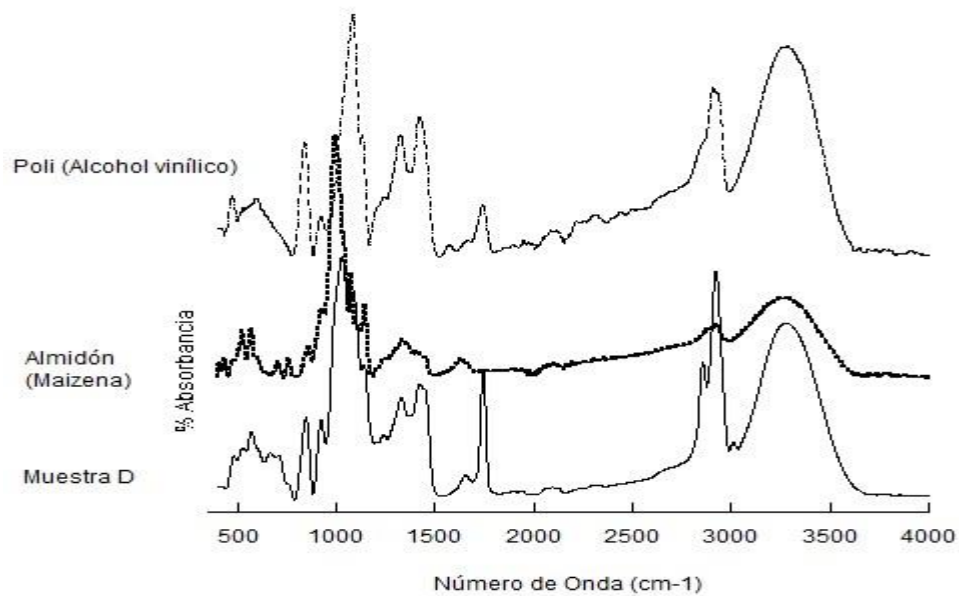


Figura 14. Espectroscopia de infrarrojo de la muestra D (45/55), Almidón /Poli (alcohol vinílico).

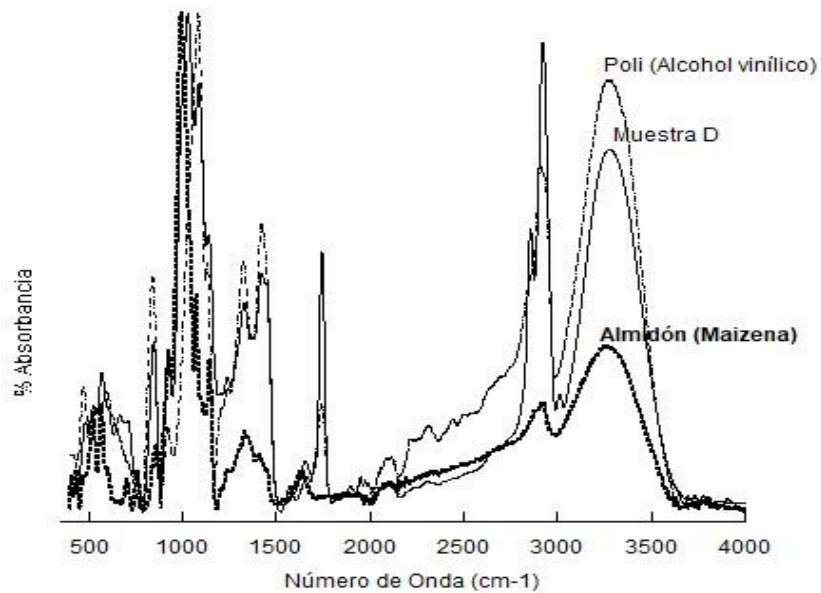


Figura 15. Espectroscopia de FTIR. Muestra D (45/55), Almidón/Poli (alcohol vinílico), todas con la misma línea de base.

En la figura 16 se muestran los espectros de IR de todas las películas elaboradas en este trabajo, en ella se puede observar que a medida que aumenta la concentración de poli (vinil alcohol) en la película, la región en el espectro entre 3100 a 3600 cm^{-1} también aumenta en la misma proporción. Esta señal es característica por la presencia de los grupos $-\text{OH}$ que están presentes en la molécula de poli (alcohol vinílico). En la misma figura también se puede observar la variación en la región de 1700 cm^{-1} ocasionado por las vibraciones que presenta el grupo $-\text{COOH}$ presente en la molécula del poli (alcohol vinílico) y aumentan también conforme lo hace la concentración en la película.

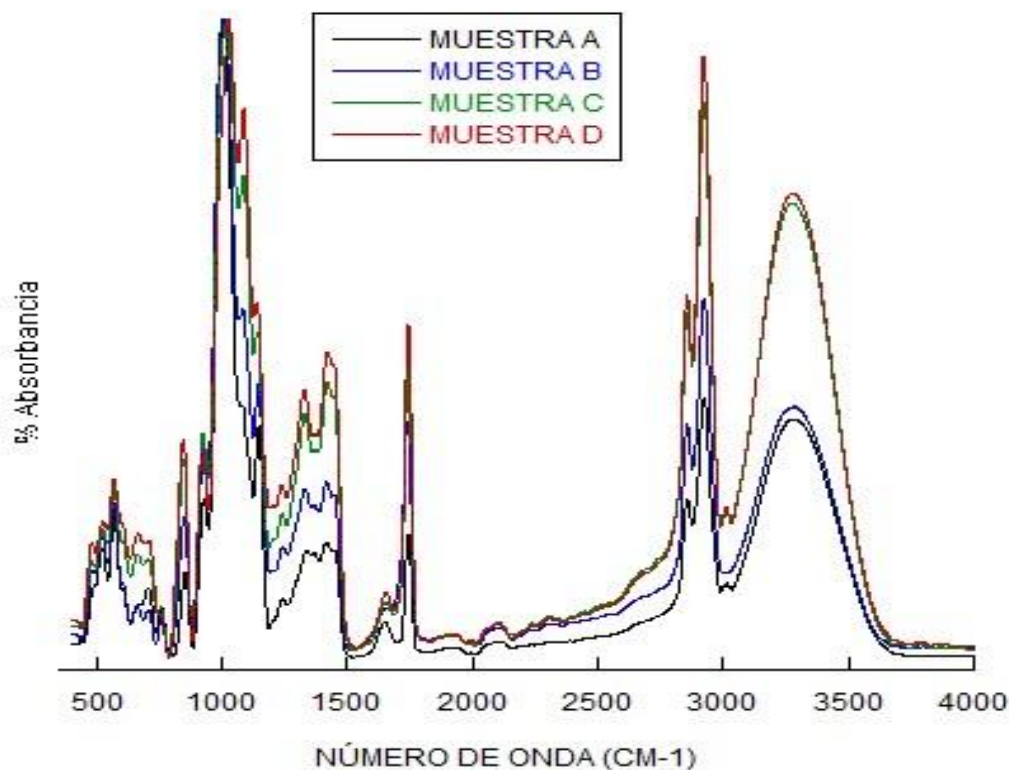


Figura 16. Espectro de FTIR de todas las películas A, B, C y D. Todas en una misma línea de base.

4.3. Prueba de degradabilidad en suelo por pérdida de peso

Una de las características de las películas plásticas a partir de polímeros biodegradables es su rápida degradación. Con esta prueba se pudo confirmar que las películas plásticas elaboradas sí logran disminuir su peso en un lapso de treinta días, en comparación con el polietileno de baja densidad usado como blanco en el cual se observó que no vario ni disminuyo su peso en este periodo de tiempo. En la tabla 14 se muestran los datos obtenidos en la prueba de degradabilidad por pérdida de peso.

Tabla 14. Pérdida de peso de las películas plásticas.

| tiempo (días) | Peso | | | | Polietileno |
|------------------|-------|-------|-------|-------|-------------|
| | A | B | C | D | |
| 0 | 0.115 | 0.09 | 0.104 | 0.110 | 0.03 |
| 3 | 0.077 | 0.137 | 0.165 | 0.166 | 0.03 |
| 5 | 0.062 | 0.088 | 0.082 | 0.151 | 0.03 |
| 8 | 0.049 | 0.085 | 0.095 | 0.125 | 0.03 |
| 10 | 0.020 | 0.075 | 0.080 | 0.095 | 0.03 |
| 14 | 0.010 | 0.075 | 0.069 | 0.075 | 0.03 |
| 23 | 0.005 | 0.080 | 0.057 | 0.065 | 0.03 |
| 31 | - | 0.070 | 0.046 | 0.055 | 0.03 |
| %pérdida de peso | 95.65 | 22.22 | 55.77 | 50.0 | 0 |

Nota: Polietileno fue usado como blanco.

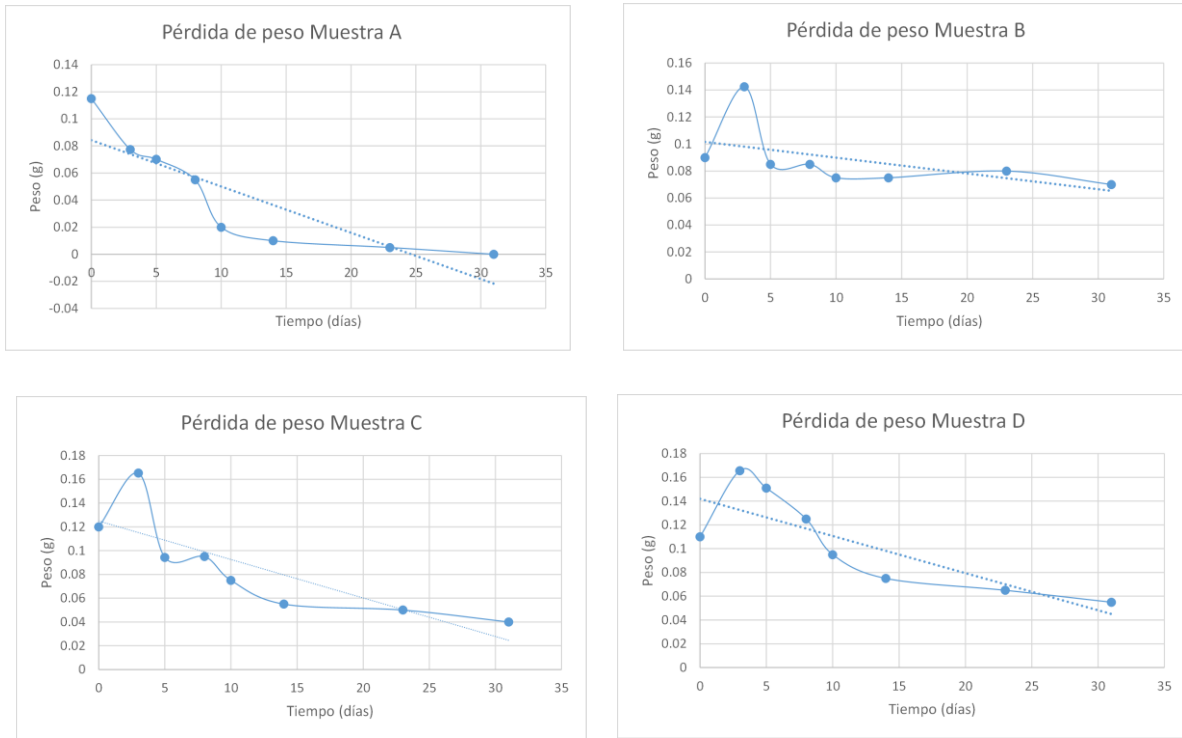


Figura 17. Gráfica pérdida de peso muestra A, B, C y D.

En la figura 17 se pueden apreciar las gráficas de pérdida de peso de la prueba de degradabilidad de las películas plásticas. En el eje de las X se encuentra el peso en gramos y en el eje de las Y los días en que se muestreo.

La película que presento mayor porcentaje de pérdida en el día 31, fue la muestra A (95%), la cual contenía mayor cantidad de almidón el cual se degrada más rápido que el poli (alcohol vinílico). de esta muestra el día 31 no fue posible pesarla debido a su difícil recolección.

La película que presento menor porcentaje de degradación fue la B (22%) la cual contenía una proporción de 75/25 almidón/ poli (alcohol vinílico). El porcentaje de degradación de la muestra C y D fue similar teniendo de 55 % y 50%, respectivamente. Todas las películas presentan una degradación mayor al 50% en un periodo de 31 días en condiciones de cielo abierto. Si bien se busca que la película sea degradable es importante considerar sus características físicoquímicas.

5. Conclusiones

A partir de los análisis de los resultados obtenidos en este Proyecto de Tesis, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- La elaboración de películas plásticas a partir de polímeros biodegradables [almidón y poli (alcohol vinílico)] se realizó con éxito.
- Las propiedades físico-químicas de las películas plásticas elaboradas fueron medidas. Dando como resultado un grosor similar entre las muestras. La muestra C presento una mayor densidad y la muestra B una menor densidad. En cuanto a la determinación de la solubilidad ésta fue alta en todas las muestras. La dureza es buena comparada con los resultados de otras investigaciones.
- La espectrofotometría mostro las bandas características del poli (alcohol vinílico) y del almidón. Confirmando la presencia de estos dos polímeros en las películas y su variación de acuerdo a la concentración.
- La prueba de degradabilidad demostró que las películas plásticas elaboradas tienen una alta degradabilidad en suelo en condiciones ambientales a cielo abierto.

6. Bibliografía

AIMPLAS, (2015) Envases ecológicos: ECOFLEXBAG bolsas de plástico más sostenibles. Economía Circular, Envase.

Asturias, M. (2004). Maíz de alimento sagrado a negocio del hambre. Acción Ecológica, Ecuador.

Calvo, F.G. e Isac, J. (2013). Introducción a la química de los polímeros biodegradables: una experiencia para alumnos de segundo ciclo de la ESO y Bachillerato. Real Sociedad Española de Química, (Vol. 109).

CIT, Centro de Investigación Técnica (2007). Degradación de los materiales plásticos. Plastvida, Argentina, Vol. 21.

CONADESUCA. (2016) Fabricación de plásticos biodegradables a partir de caña de azúcar.

Echeverri, E., Vallejo, C., Londoño, M. (2009). Síntesis y caracterización de hidrogeles de alcohol polivinílico por la técnica de congelamiento/ descongelamiento, para aplicaciones médicas. Revista EIA, Colombia.

Endicott, S., Brueland, B., Keith, R. (2014) Maíz crecimiento y desarrollo. Dupont Pionner.

Enríquez, M., Velasco, R., Ortiz, V. (2012). Composición y procesamiento de películas biodegradables basadas en almidón. Biotecnología en el sector Agropecuario y Agroindustrial, (Vol. 10).

Encalada, K., Valle, A. y Chango, J. (2015). Estudio térmico de mezclas de poli (vinil alcohol) y almidón de achira por calorimetría diferencial de barrido. Nuevas Tecnologías Aplicadas al Desarrollo del Territorio.

ISOTools (2018). Día Mundial del Medio ambiente: Sin contaminación por plásticos, ISOTools.

Gálvez, A. (2016). Elaboración de plástico biodegradable a partir del almidón extraído del maíz (*Zea Mays*) (tesis de pregrado). Universidad de San Carlos Guatemala, Guatemala.

García, A. V. (2015). Obtención de un polímero degradable a partir de almidón de maíz. (Tesis pregrado). Escuela Especializada en Ingeniería ITCA-FEPADE, Santa Tecla, El Salvador.

García, J. M. (2014). La edad de los polímeros un mundo de plástico. Burgos, España, Universidad de Burgos.

Gutiérrez, L. F., Arias, S., Garzón, D., López, D. M., Osorio, A. (2014). Transición vítrea en alimentos: sistemas binarios agua-carbohidratos. Vector, (Vol. 9).

Holguin, J.S. (2019). Obtención de un bioplástico a partir de almidón de papa (Tesis pregrado) Universidad de América, Bogotá D.C.

Labeaga, A. (2018). Polímeros biodegradables. Importancia y potenciales aplicaciones. (Tesis maestría). Universidad Nacional de Educación a Distancia Máster Universitario en Ciencia y Tecnología Química.

Metal Actual. (2015). Durómetros para garantizar la calidad metalmeccánica. Revista Metal Actual (Vol. 38).

Meneses, J. (2007). Síntesis y caracterización de un polímero biodegradable a partir de almidón de yuca. Revista, Escuela de Ingeniería de Antioquia, (Vol. 8).

Morrison, R. y Boyd R. (1998). Química Orgánica. Pearson.

Muñoz, J. (2014) Evaluación, caracterización y optimización de un bioplástico a partir de la combinación de almidón de maíz, yuca y glicerol en sus propiedades físicas y de barrera. (Tesis pregrado) Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano Honduras.

Navia, D. (2014). Evaluación de propiedades físicas de bioplásticos termocomprimidos elaborados con harina de yuca. Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial (Vol 12).

Palacios, L. M. (2012). Factibilidad técnica para la obtención de panela porcionada de alta velocidad de disolución a nivel trapiche. (Tesis pregrado).Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C.

Pascual, C. (2011). Determinación de la biodegradabilidad y compostabilidad de los materiales plásticos. Packaging para Alimentos y Bebidas.

Perilla, J. (1998). Tendencias en la síntesis de alcohol polivinílico de alto peso molecular. Universidad Nacional de Colombia. Revista Ingeniería e Investigación Vol. 40.

Piqué, T. (2012). Uso de espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) en el estudio de la hidratación del cemento. Concreto y cemento. Investigación y desarrollo, (Vol. 3).

Ramaraj, B., (2016). Crosslinked Poly(vinyl alcohol) and Starch Composite Films: Study of Their Physicomechanical. Thermal, and Swelling Properties. Journal of Applied Polymer Science, (Vol. 103).

Ramos, M. (2018). Almidón modificado: Propiedades y usos como recubrimientos comestibles de frutas y hortalizas frescas. Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Revista Iberoamericana de Tecnología de Postcosecha, (vol. 19).

Rescignato, N. Fortunati, E. Montesano, S., (2014). PVA bio-nanocomposites: A new take- off using cellulose nanocrystals and PLGA nanoparticles. EISEVIER, Carbohydrate Polymers. (Vol. 99).

Rodríguez, A. (2007) Biodegradabilidad de materiales bioplásticos. Instituto de Investigación para la Industria Alimenticia, La Habana, (Vol. 22).

Rodríguez, L. T., Lecot, J., Pérez, A., (2011). Campderrós, M. E., Effect of saccharides on glass transition temperatures of frozen and freeze dried bovine plasma protein. ELSEVIER Journal of Food Engineering, (Vol.106).

Rosales, A. (2016). Obtención de biopolimero plástico a partir del almidón de malanga (*Colocasia esculenta*), por el método de polimerización por condensación en el laboratorio 110 de la UNAN- Managua. (Teses de pregrado) Managua.

Shanyang, M., Sapuan, S., Jawaid, M. (2015). Effect of Plasticizer Type and Concentration on Tensile, Thermal and Barrier Properties of Biodegradable Films

Struers Ensuring Certainty .(2019). Ensayos de Dureza. España:

IUPAC. Compendium of Chemical Terminology, 2nd ed. (the "Gold Book"). Compiled by A. D. McNaught and A. Wilkinson. Blackwell Scientific Publications, Oxford.

Valencia, A., Rivera, C., Murillo, E. A. (2013). Estudio de las propiedades de mezclas de alcohol polivinilico- almidón de yuca- sorbitol obtenidas por casting. Revista Colombiana de Materiales (Vol. 4).

Valero-Valdivieso, M., Ortegón, Y., Uscategui, Y. (2013). Biopolímeros: avances y perspectivas. *Dyna*, (Vol. 181).

Villada, H., Acosta, H. Velasco, R. (2008). Investigación de almidones termoplásticos, precursores de productos biodegradables. Información Tecnológica, (Vol. 19).

Wade, L.G. (2012). Química Orgánica. México. Pearson.

Anexos

En la tabla 15 se presenta la humedad que el suelo presentó en la prueba de degradabilidad.

Tabla 15. Humedad en la prueba de degradabilidad.

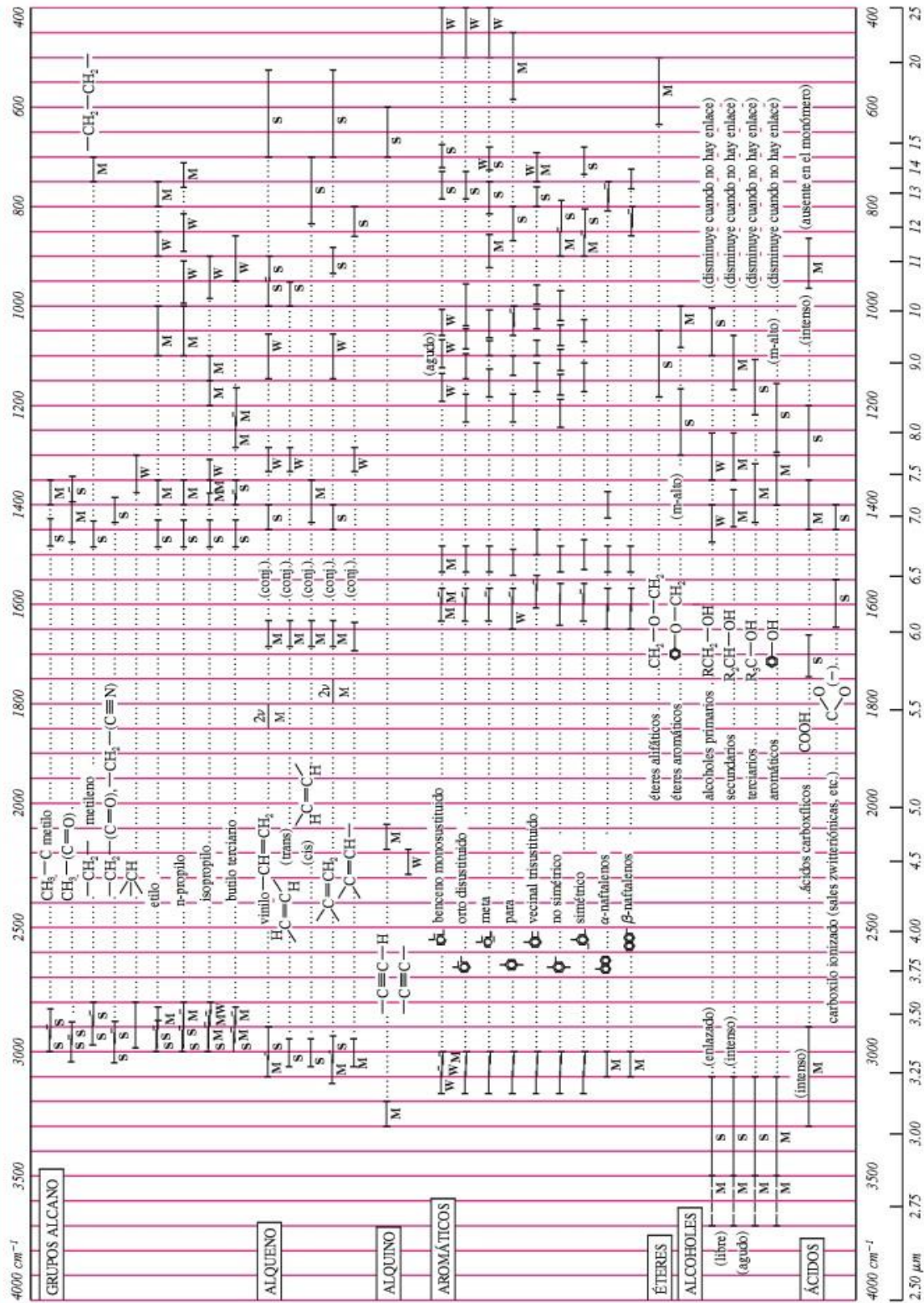
| pH | Humedad | | |
|----|---------------------|-------------------|----------------|
| | peso inicial (g) | peso final (g) | Humedad (%) |
| 6 | 10.1760 | 10.0630 | 1.12 |

En la prueba de degradación en suelo se tomaron valores de cada muestra por duplicado, estos valores se reportan en la tabla 16.

Tabla 16. Peso de las muestras en la prueba de degradabilidad.

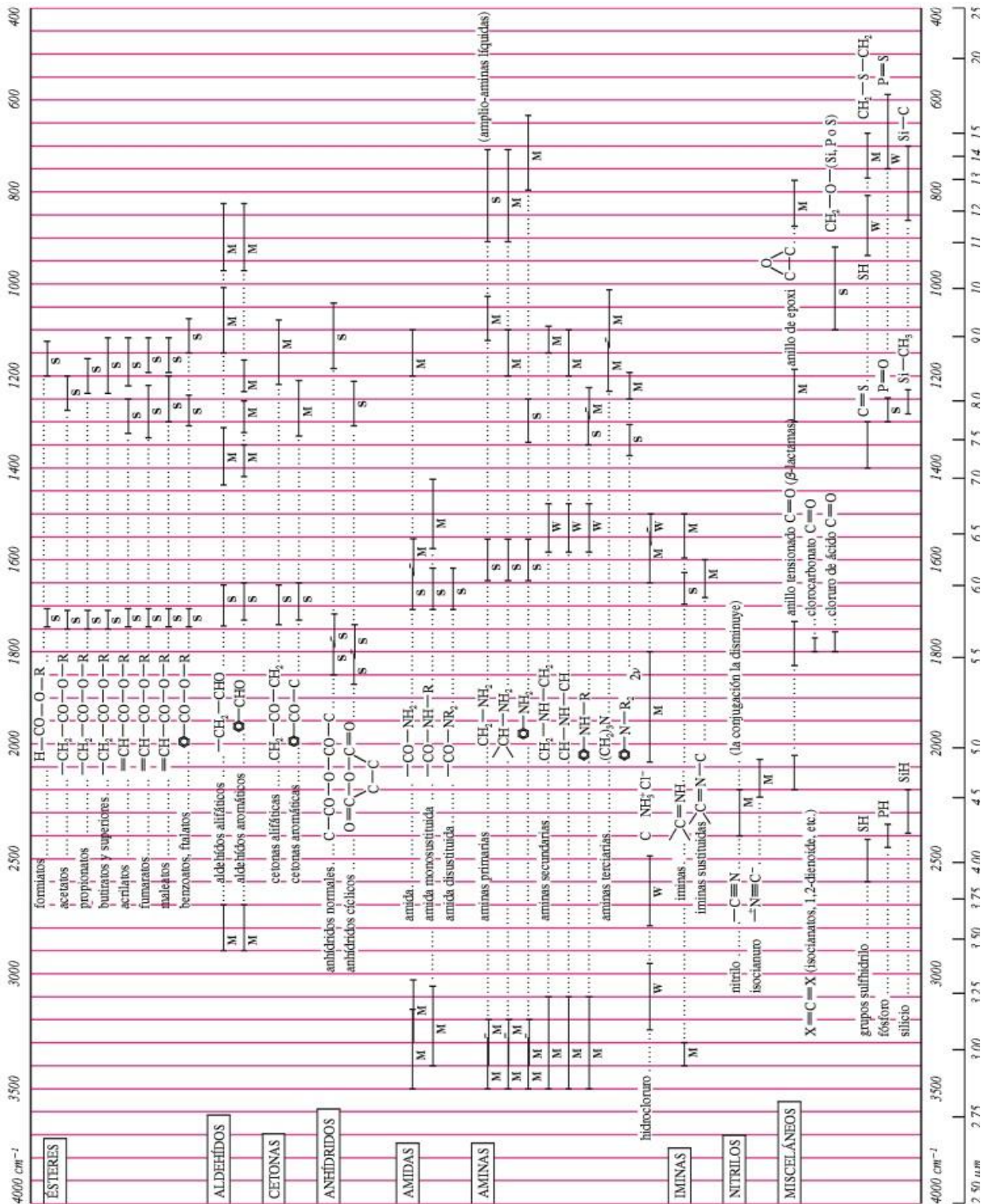
| tiempo (días) | A | | B | | C | | D | | Polietileno | |
|------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------------|------|
| | M1 | M2 | M1 | M2 | M1 | M2 | M1 | M2 | M1 | M2 |
| 0 | 0.12 | 0.11 | 0.09 | 0.09 | 0.12 | 0.12 | 0.1 | 0.12 | 0.03 | 0.03 |
| 3 | 0.0742 | 0.0806 | 0.1032 | 0.1817 | 0.1496 | 0.1807 | 0.1607 | 0.1706 | 0.03 | 0.03 |
| 5 | 0.0367 | 0.1036 | 0.091 | 0.0851 | 0.0782 | 0.1104 | 0.1452 | 0.1568 | 0.03 | 0.03 |
| 8 | 0.03 | 0.08 | 0.08 | 0.09 | 0.1 | 0.09 | 0.12 | 0.13 | 0.03 | 0.03 |
| 10 | 0.02 | 0.02 | 0.07 | 0.08 | 0.08 | 0.07 | 0.09 | 0.1 | 0.03 | 0.02 |
| 14 | 0.01 | 0.01 | 0.07 | 0.08 | 0.06 | 0.05 | 0.08 | 0.07 | 0.03 | 0.03 |
| 23 | 0.01 | 0 | 0.08 | 0.08 | 0.04 | 0.06 | 0.07 | 0.06 | 0.03 | 0.03 |
| 31 | 0 | 0 | 0.07 | 0.07 | 0.03 | 0.05 | 0.06 | 0.05 | 0.03 | 0.03 |

APÉNDICE 2A IR: Frecuencias infrarrojas características de los grupos (f = fuerte, m = medio, d = débil); las bandas armónicas o sobretonos se marcan como 2p)



Frecuencia de infrarrojo. Fuente: Wade, 2012.

Cortesía de N. B. Colthup, Stanford Research Laboratories, American Cyanamid Company y del editor del *Journal of the Optical Society*.



Frecuencia de infrarrojos. Fuente: Wade, 2012