



**PRODUCCIÓN DE ALMIDÓN DE LA ARRACACHA
(*ARRACACIA XANTHORRIZA*) PARA LA
OBTENCIÓN DE UN BIOPOLÍMERO DE PROBABLE
APLICACIÓN INDUSTRIAL.**

Karen Daniella Olivero García

Universidad de Pamplona
Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Departamento de Ingeniería Química
Pamplona, Colombia
2019

Producción de almidón de la Arracacha (*Arracacia xanthorrhiza* *B.*) para la obtención de un biopolímero de probable aplicación industrial.

Karen Daniella Olivero García

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniero Químico

Director:

Msc. Ing. Química Daissy Lorena Restrepo Serna

Co- director:

José H. Quintana Mendoza

Co-director:

Bladimir Ramón Valencia

Universidad de Pamplona
Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Departamento de Ingeniería Química
Pamplona, Colombia

2019

Agradecimientos

Mis padres se merecen toda mi gratitud sin ellos y su sueño de verme convertida en una profesional no sería posible este logro, los amo.

Gracias a mi universidad por darme la oportunidad de adquirir grandes conocimientos y conocer a personas que se convirtieron en hermanos que desde su amistad aportaron a mi vida estudiantil y personal, Derly, Johan, Vivi y tu Ana también, muchas gracias.

Mis profundo respeto y agradecimiento va para los docentes que, con su colaboración, hicieron posible que este documento alcanzara los objetivos que se plantearon.

Y finalmente, unas gracias enorme a esa personita que, con su constante apoyo, aliento en los momentos más difíciles y tensionante de mi carrera contribuyo a culminación de esta aventura, llamada ingeniería química, y se quedó hasta el final, Ricardo esto también va por ti.

TABLA DE CONTENIDO

PRODUCCIÓN DE ALMIDÓN DE LA ARRACACHA (*ARRACACIA XANTHORRHIZA*)
PARA LA OBTENCIÓN DE UN BIOPOLÍMERO DE PROBABLE APLICACIÓN
INDUSTRIAL..... I

RESUMEN	VII
LISTA DE TABLAS	IX
LISTA DE FIGURAS	X
NOMENCLATURA	XII
OBJETIVOS	14
Objetivo General.....	15
Objetivos específicos	15
INTRODUCCIÓN	16
CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO	18
1.1. Polímeros	19
1.1.1. Clasificación de los polímeros.....	19
1.1.2. Comportamiento térmico de los polímeros.	21
1.1.3. Modificación de los polímeros con aditivos	21
1.1.4. Mecanismos de degradación de polímeros	26
1.1.5. Polímeros biodegradables.....	28
1.2. La arracacha	39
1.2.1. Generalidades	39
1.2.2. Producción de arracacha en Colombia	41
1.2.3. Cultivo y cosecha	42
1.2.4. Clasificación botánica.....	43
1.2.5. Composición química.	43
CAPÍTULO 2: METODOLOGÍA	46
2.1. Selección del tubérculo y extracción de almidón	47
2.2. Caracterización fisicoquímica del almidón de arracacha	48
2.2.1. Apariencia microscópica	48
2.2.2. Determinación de pH.....	48
2.2.3. Determinación de humedad por pérdida de peso.....	48
2.2.4. Determinación de cenizas totales (calcinación).....	49
2.2.5. Determinación de temperatura de gelatinización.	49
2.2.6. Determinación del contenido de amilosa y amilopectina.....	50
2.2.7. Determinación de índice de absorción de agua (IAA), índice de solubilidad en agua (ISA) y poder de hinchamiento (PH).....	51
2.3. Esquema de procesado del material termo-plastificado.	52
2.4. Análisis infrarrojo.....	53
2.5. Ensayos de tracción.....	53
2.6. Biodegradabilidad	53
2.7. Aplicación industrial	53

CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y ANÁLISIS	55
3.1. Rendimiento del almidón	56
3.2. Apariencia microscópica	57
3.3. Caracterización fisicoquímica	58
3.4. Biopelículas	61
3.5. Análisis infrarrojo.....	66
3.6. Ensayos de tracción.....	72
3.7. Biodegradabilidad	76
3.8. Aplicación industrial	78
CONCLUSIONES	80
BIBLIOGRAFÍA	82

RESUMEN

Los almidones nativos son conocidos por su bajo costo, biodegradabilidad completa y renovabilidad, por lo tanto, son candidatos prometedores para su uso en diferentes procesos de transformación, dentro de los que se encuentra la obtención de almidón termoplastificado por medio de plastificantes. Para la obtención del almidón es posible utilizar diferentes productos agrícolas ya sea cereales, frutos, hojas y/o tubérculos, en este último grupo se encuentra la arracacha, raíz de alta producción en Colombia. Esta investigación se enfocó en la extracción del almidón de la arracacha variedad amarilla producida en Toledo, Norte de Santander, con el fin de obtener biopelículas de almidón termoplastificado, con plastificantes como agua destilada, glicerina y urea, evaluando diferentes concentraciones y combinaciones de estas, así como la temperatura en la cual se procesan las muestras, para su posterior caracterización y evaluación de una posible aplicación a nivel industrial.

El proceso de extracción del almidón obtuvo un rendimiento de $12.18 \pm 2.58\%$, por su parte, la caracterización realizada al almidón arrojo como resultado un pH de 4.8 ± 0.06 , un porcentaje de humedad y cenizas de 37.71 ± 0.19 y 0.12 ± 0.00 , respectivamente, con una temperatura de gelatinización de 63.16 ± 0.76 ; un porcentaje de $26,15 \pm 0.22\%$ de amilosa, un índice de absorción de agua, un porcentaje de índice de solubilidad en agua y poder de hinchamiento, de 11.88 ± 0.34 , 1.75 ± 0.82 y 12.09 ± 0.36 , respectivamente, además un tamaño de gránulo promedio de $7.75 \mu\text{m}$.

En la obtención de las biopelículas del almidón termoplastificado se emplearon temperaturas de 18, 60 y 75°C , dichas muestras fueron sometidas a análisis del espectro infrarrojo, pruebas de tracción, análisis calorimétrico (termogravimétrico y calorimetría diferencial de barrido), prueba de biodegradabilidad y, finalmente, con los datos obtenidos

en la caracterización se pudo establecer o determinar que las biopelículas tienen una probable aplicación como embalaje o empaques.

Palabras clave: *Almidón, Agentes plastificantes, Bioplásticos, Materias primas renovables.*

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de clasificación de los aditivos para polímeros según su función.	23
Tabla 2. Área y producción nacional de arracacha por departamento.....	42
Tabla 3. Composición química de la arracacha.	44
Tabla 4. Composición de las raíces y las cepas de acuerdo a la variedad de arracacha. (por cada 100 g de muestra).	44
Tabla 5. Preparación de la curva estándar de amilosa.	51
Tabla 6. Rotulado de muestras, combinaciones de proporción entre el almidón y los plastificantes con las temperaturas de procesamiento.	52
Tabla 7. Muestras procesadas de Arracacha con su determinado rendimiento del proceso de extracción de almidón.....	56
Tabla 8. Valores para la determinación de la humedad del almidón procesado.	58
Tabla 9. Caracterización fisicoquímica del almidón de arracacha.	59
Tabla 10. Numeración de los ensayos de tracción realizado a cada biopelícula.....	72
Tabla 11. Principales propiedades mecánicas de las biopelículas a partir de almidón de arracacha termoplastificado seleccionadas.	74
Tabla 12. Propiedades mecánicas de diversos materiales.	74

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Clasificación de los polímeros termoplásticos según el método de producción, biodegradabilidad y mezclas, con algunos ejemplos por cada clasificación. Fuente: Adaptado de (Eduardo & Alzate, 2016).....	29
Figura 2. Estructura de una molécula de amilosa. Fuente: (Avil, 2006).....	32
Figura 3. Segmento de una molécula de amilopectina. Fuente: (Avil, 2006).....	32
Figura 4. Esquema de segmento de la molécula de amilopectina. Fuente: (Outline, 2019).	33
Figura 5. Distribución de las zonas de cultivo de la Arracacha en la cordillera de los Andes. Fuente: (Virtual, 2005).....	40
Figura 6. Planta de arracacha con partes aéreas y subterráneas con sus respectivas partes. Fuente: (Rivera Varón et al., 2015).	40
Figura 7. Figura superior, áreas de cultivos empleadas para la producción de arracacha en Colombia en los años 2008-2018. Figura inferior, Producción de arracacha en miles de ton/año en Colombia entre 2008-2018. Fuente: Adaptado de (Minagricultura, 2019).	41
Figura 8. Esquema de la extracción del almidón a partir de la arracacha.	47
Figura 9. Microfotografías de gránulos de almidón con objetivo de 40X	57
Figura 10. Microfotografías de gránulos de almidón con objetivo de 10X.	57
Figura 14. Combinación 3 Mx 1	61
Figura 13. Combinación 2 Mx 2.....	61
Figura 12. Combinación 2 Mx 1.....	61
Figura 11. Combinación 1 Mx 1.....	61
Figura 19. Combinación 3 Mx3.....	62
Figura 20. Combinación 4 Mx1.....	62
Figura 21. Combinación 4 Mx2.....	62
Figura 18. Combinación 3 Mx2.....	62
Figura 16. Combinación 2 Mx4.....	62
Figura 15. Combinación 2 Mx3.....	62
Figura 17. Combinación 1 Izquierda Mx2; Derecha Mx3.....	62
Figura 22. Combinación 5 Mx1.....	63
Figura 23. Combinación 5 Mx2.....	63

Figura 31. Combinación 4 Mx4.....	64
Figura 29. Combinación 3 Mx5.....	64
Figura 28. Combinación 3 Mx4.....	64
Figura 27. Combinación 2 Mx6.....	64
Figura 24. Combinación 1 Mx4.....	64
Figura 25. Combinación 1 Mx5.....	64
Figura 26. Combinación 2 Mx5.....	64
Figura 30. Combinación 4 Mx3.....	64
Figura 33. Combinación 5 Mx4.....	65
Figura 32. Combinación 5 Mx3.....	65
Figura 34. Espectro infrarrojo del almidón extraído de arracacha.....	66
Figura 35. Espectro IF de urea.....	67
Figura 36. Espectro IF de glicerina.....	68
Figura 37. Espectro infrarrojo de la biopelícula Mx2 de la combinación 2.....	69
Figura 38. Espectro infrarrojo de las biopelículas procesadas a 60°C, de las combinaciones 2, 4 y 5.....	70
Figura 39. Espectro infrarrojo de las biopelículas procesadas a 75°C, de la combinación 3.....	70
Figura 40. Espectro infrarrojo de las biopelículas procesadas a 75°C, de las combinaciones 2, 4 y 5.....	71
Figura 41. Equipo empleado en las pruebas de tracción.....	72
Figura 42. Gráfica esfuerzo vs deformación de los ensayos de tracción de las biopelículas analizadas. Fuente: Autor.....	73
Figura 43. Biopelículas expuestas al ambiente día 1.....	76
Figura 44. Biopelículas expuestas al ambiente día 2.....	76
Figura 45. Biopelículas expuestas al ambiente día 3.....	76
Figura 47. Biopelículas expuestas al ambiente día 5.....	76
Figura 46. Biopelículas expuestas al ambiente día 4.....	76
Figura 49. Biopelículas expuestas al ambiente día 7.....	77
Figura 48. Biopelículas expuestas al ambiente día 6.....	77
Figura 50. Gráfico representativo de las propiedades de la biopelícula Mx2 de la combinación 3.....	78
Figura 51. Gráfico representativo de las propiedades de las biopelículas Mx2 y Mx4 de la combinación 5.....	79

NOMENCLATURA

ABS: Acrilonitrilo butadieno estireno

Comb: Combinación

EVA: Etilvinilacetato

DSC: Calorimetría diferencial de barrido

g: Gramos

IF: Infrarrojo

Mx: Muestra

LDPE: Polietileno de baja densidad

PA: Poliamida

PBAT: Poly (butylene adipate-co-terephthalate)

PE: Polietileno

PET: Polietileno-tereftalato

PGA: Ácido poliglicólico

PLA: Ácido poliláctico

PLC: Policaprolactona

PP: Polipropileno

PS: Poliestireno

PTT: Tereftalato de politrimetileno

PVA: Ácido polivinílico

PVC: Policloruro de vinilo

PVOH: alcohol polivinílico

Tg: Temperatura de transición vítrea

TGA: Termogravimétrico

Tm: Temperatura de fusión

TPS: Almidón termoplastificado.

OBJETIVOS

Objetivo General

Producir almidón de la Arracacha (*Arracacia xanthorrhiza*) para la obtención de un biopolímero de probable aplicación industrial.

Objetivos específicos

- Obtener y evaluar el almidón extraído de la Arracacha.
- Generar biopelículas a partir del biopolímero obtenido del almidón de la Arracacha.
- Caracterizar las propiedades físico mecánicas de las biopelículas y del biopolímero obtenido.
- Identificar una aplicación industrial potencial del biopolímero.

INTRODUCCIÓN

Desde que el ser humano ha explotado los derivados del petróleo, más específicamente los polímeros, no ha previsto con claridad el manejo de los residuos que estos generan, por ello en muchos casos terminan en bosques y cuencas hídricas, en los cuales no se degradan con facilidad, puesto que los plásticos tardan entre 150 a 1000 años, si permanecen bajo tierra, ya que difícilmente los microorganismos pueden descomponerlos (“Degradación de los materiales,” 2018) una alternativa a esta problemática es reciclar, donde en países como Colombia de las doce millones de botellas que se producen diariamente solo 3 millones se reciclan, obteniendo productos tales como: nuevos envases, ropa deportiva, edredones, etcétera, a partir de polietileno tereftalato (PET) (Morales, 2019), este ejemplo es uno de los tantos esfuerzos que se hacen a nivel mundial para combatir los impactos negativos asociados, como lo es la contaminación, que se vienen desarrollando desde la década de 1980 (Schmind & Kalpakjian, 2002), sin embargo, los polímeros logran reciclarse un número determinado de veces restringiendo este recurso para tratar estos desechos adicional a ello, no todos logran reciclarse (Atienza, Miriam. Gutierrez, 2015), siendo una limitante importante a los precarios modelos de reciclaje de muchas poblaciones.

En la actualidad, los plásticos se han convertido en objetos indispensables desde las grandes industrias como lo son, las de alimentos, farmacéuticas, cosméticas, electrodomésticas, jugueterías entre otras, hasta los hogares que son los consumidores finales (“¿Dónde usamos los plásticos en el día a día?,” 2017) gracias a su versatilidad y bajo costo, es vital encaminar investigaciones al desarrollo de nuevas alternativas de obtención de polímeros, sin presentar una potencial toxicidad, así como compuestos asimilables por el medio ambiente, es allí donde los llamados plásticos biodegradables o biopolímeros se presentan como una opción viable, para un desarrollo sostenible, así mismo la búsqueda y evaluación de nuevos posibles precursores de este tipo de biopolímeros, abren las puertas a procesos más limpios y amigables con el medio ambiente.

CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO

CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO

1.1. Polímeros

Se define como polímero a una macromolécula resultante de la unión de muchas moléculas, llamadas monómeros, mediante enlaces covalentes, es importante hacer la distinción entre polímeros y plásticos. Un polímero se considera un plástico obedeciendo a su comportamiento ante la aplicación de un esfuerzo mecánico, en este caso el plástico no recupera su forma original, existiendo así diversos tipos de polímeros distintos a los plásticos; los polímeros pueden recibir diferentes clasificaciones, según su origen, por su estructura molecular, por sus propiedades mecánicas, químicas y/o térmicas, etcétera (Máster, 2018).

1.1.1. Clasificación de los polímeros

1.1.1.1. Polímeros naturales y sintéticos.

Dentro de la clasificación de los polímeros con respecto a su origen se encuentran los polímeros naturales, ejemplo de estos son la lana, la celulosa, el almidón, el caucho natural, entre otros, y los polímeros sintéticos, se encuentran los plásticos, las pinturas, recubrimientos adhesivos, pegamentos, resinas, etcétera (Besednjak, 2005).

1.1.1.2. Polímeros amorfos y cristalinos

En respuesta a su estructura se distinguen polímeros amorfos y semicristalinos, donde los amorfos carecen de forma definida u orden en su estructura por agrupación de macromoléculas lineales o ramificadas sin que posean un principio de ordenamiento en la

distribución de las cadenas. Los polímeros amorfos se caracterizan por mostrar un rápido cambio en propiedades físicas del material como lo son: el volumen, calor específico y el coeficiente de dilatación térmica en un rango diverso de grados, reflejando macroscópicamente una transición de un estado sólido a un estado líquido de alta viscosidad, aportando flexibilidad al compuesto (Benavente & Madrid, 1997); por otro lado los polímeros semicristalinos poseen regiones de ordenamiento periódico caracterizado por un orden tridimensional donde las cadenas se organizan paralelamente, teniendo como base que todas las moléculas que poseen una cierta regularidad molecular serán capaces de cristalizar bajo condiciones fijas de presión, temperatura, tensión, que le permite a las moléculas extenderse o tomar conformaciones helicoidales. De acuerdo a las condiciones en las que es llevada la cristalización del polímero, estos con capacidad de cristalizarse podrán ser amorfos o semicristalino. Por lo general para describir esta característica se emplea el término cristalino en lugar de semicristalino, aunque los polímeros no son totalmente cristalinos (Benavente & Madrid, 1997; *Lucía Fernández-Espada Ruiz Departamento De Ingeniería Química*, 2016; Máster, 2018).

1.1.1.3. Polímeros homopolímeros y copolímeros.

Los polímeros también se clasifican como homopolímeros y copolímeros, en función de su estructura molecular. Los homopolímeros cuentan con cadenas formadas por un solo tipo de monómeros, entre los que se tienen al polietileno, polipropileno, PVC, etcétera, distinto a los copolímeros que poseen varios tipos de monómeros en su estructura, por ejemplo: ABS, EVA. De igual forma, según sea el orden de los monómeros en la estructura de los copolímeros se destacan cuatro tipos, los copolímeros al azar, copolímeros alternados, copolímeros en bloques o de segmentos y copolímeros de injerto (T. Gutierrez, 2019). Sin embargo, la clasificación con mayor relevancia se da en función de las propiedades térmicas ligadas a su comportamiento y procesabilidad, las cuales son los polímeros termoplásticos, elastómeros y termoestables (Besednjak, 2005; Máster, 2018).

1.1.1.4. Polímeros termoplásticos, termoestables y elastómeros.

Los polímeros termoplásticos poseen la capacidad de convertirse en fluidos al calentarse a determinadas temperaturas, permitiendo moldearlo, tomando la forma proporcionada al enfriarse, ya que los polímeros termoplásticos a consecuencia de la aplicación de calor ven disminuidas las fuerzas intermoleculares, lo que les da la capacidad de ser moldeables

(Lucía Fernández-Espada Ruiz Departamento De Ingeniería Química, 2016); cabe resaltar que este proceso es totalmente reversible. No obstante, el material puede sufrir una degradación irreversible si una vez fundido es sometido a un aumento de temperatura que ocasione vibraciones en sus moléculas tan fuertes que rompen sus enlaces. Los termoplásticos se caracterizan por ser blandos y dúctiles. Por otro lado, los polímeros termoestables se compactan o endurecen al ser sometidos a calentamiento, mostrando un comportamiento de entrelazamiento covalente de las cadenas moleculares, dificultando la rotación de los enlaces, pero las altas temperaturas inducen a la ruptura de estos enlaces. Los polímeros termoestables son duros, y más frágiles que los termoplásticos. Por su parte, los polímeros elastómeros pueden ser capaces de experimentar grandes deformaciones y posteriormente regresar a su forma original, están conformados por estructuras moleculares muy torsionadas, dobladas y plegadas (Callister, 2007).

1.1.2. Comportamiento térmico de los polímeros.

Si los polímeros son sometidos a procesos que involucran calentamiento estos pueden tener variaciones en sus propiedades físicas y químicas en rangos de temperaturas característicos, considerados temperaturas de transición, dentro de los que se encuentran la temperatura de transición vítrea y la temperatura de fusión, siendo la temperatura de transición vítrea (T_g), la temperatura en la que un polímero pasa de ser duro y quebradizo, a presentar un comportamiento blando y maleable, este cambio se debe a la interacción y movimiento de los átomos en la estructura del polímero, beneficiado por el volumen libre en este. Es característico de los polímeros amorfos. Tres factores inciden directamente en la temperatura de transición vítrea los cuales son:

- Flexibilidad de la cadena principal. Cuanto mayor sea la flexibilidad de la cadena, menor será la temperatura de transición vítrea.
- Forma de los grupos pendientes. En muchos casos estos actúan como anzuelos y anclas, obstaculizando el movimiento de las moléculas.
- Espacio entre cadenas. En el mayor de los casos, entre más espacio exista entre las cadenas del polímero, la temperatura de transición vítrea disminuirá.

La temperatura de fusión (T_m) en los polímeros es la temperatura donde las zonas cristalinas se funden. Es propio de los polímeros semicristalinos. La cristalinidad y la estructura del polímero son determinantes en la temperatura de fusión (T. Gutierrez, 2019).

1.1.3. Modificación de los polímeros con aditivos

La adición de aditivos a los polímeros es un proceso necesario si se desea mejorar sus propiedades y procesabilidad. Para obtener almidón termoplástico, es necesario hacer cambios en la estructura de este, por medio de presión, calor o métodos mecánicos (Ventures, 2007). Los aditivos más empleados son: Rellenos, refuerzos, plastificantes, espumantes, colorantes, estabilizantes térmicos, retardantes de llama (T. Gutierrez, 2019), cabe resaltar que los aditivos no se agrupan o clasifican por composición química sino por la función que ejercen en el material (Beltran & Marcilla, 2012), en la tabla 1 se citan algunos ejemplos.

- Los Rellenos pueden ser de tipo orgánico, inorgánico, minerales, naturales o sintéticos, se consideran dilatadores o extensores que se adicionan en gran proporción para producir grandes volúmenes de material polimérico en presencia de una pequeña cantidad de resina. Sin embargo, con el uso de rellenos se disminuye las propiedades del material, restringiendo su uso.
- Los refuerzos a los polímeros se hacen con filamentos de vidrio, otros tipos de polímeros o carbono reforzando la resistencia y rigidez del material (Mariano, 2011).
- Plastificantes, Debido a que, el almidón presenta limitaciones en diversas aplicaciones por ser muy soluble en agua, difícil de procesar y frágil, es preciso emplear agentes plastificantes que permite su procesamiento por extrusión e inyección, reduciendo su temperatura de transición vítrea y adicional a ello, disminuye la degradación del material (Ventures, 2007). Los plastificantes representan el grupo de aditivos más empleados (T. Gutierrez, 2019).
- Los espumantes presentan cuatro ventajas las cuales son: reducción de peso, aceleración del proceso, reducción de ciclos y eliminación de defectos. Estos son productos que al estar en contacto con el polímero, reacciona liberando gases a consecuencia de un aumento de temperatura (Quiminet, 2017).

- Los colorantes empleados en su mayoría son de tipo orgánico, que modifican el color del polímero al cual es aplicado, proporcionando acabados totalmente traslucidos y más aún si es compatible con el polímero (Beltran & Marcilla, 2012).
- Los estabilizantes térmicos se usan en polímeros halogenados, debido a que, este tipo de polímeros tiene una temperatura de degradación inferior a la temperatura en el que son procesado, ejemplo de estos polímeros son los obtenidos a partir de cloruro de vinilo y del vinilideno (Beltran & Marcilla, 2012).
- Los retardantes de llama son necesarios cuando los polímeros serán expuestos a altas temperaturas o en procesos que involucren electricidad (T. Gutierrez, 2019).

Tabla 1. Tipos de clasificación de los aditivos para polímeros según su función.

FUNCIÓN DEL ADITIVO	TIPO DE ADITIVO
ADITIVOS QUE FACILITAN EL PROCESADO	ESTABILIZANTES LUBRICANTES
ADITIVOS QUE MODIFICAN LAS PROPIEDADES MECANICAS	PLASTIFICANTES CARGAS REFORZANTES MODIFICADORES DE IMPACTO
ADITIVOS QUE DISMINUYAN COSTES DE LAS FORMULACIONES	CARGAS DILUTENTES Y EXTENDEDORES
MODIFICADORES DE PROPIEDADES SUPERFICIALES	AGENTES ANTIESTATICOS ADITIVOS ANTIDESLIZAMIENTO ADITIVOS ANTIDEGASTE PROMOTORES DE ADHESIÓN
MODIFICADORES DE PROPIEDADES ÓPTICAS	PIGMENTOS Y COLORANTES AGENTES DE NUCLEACIÓN
ADITIVOS CONTRA EL ENVEJECIMIENTO	ESTABILIZANTES CONTRA LA LUZ UV FUNGICIDAS
OTROS	AGENTES ESPUMANTES RETARDANTES DE LLAMA

Fuente: (Beltran & Marcilla, 2012).

Debido a que este documento se enfoca en la obtención de biopolímeros empleando el almidón de la arracacha y plastificantes se profundizara en este tipo de aditivo.

1.1.3.1 Plastificantes

Como se mencionó anteriormente los plastificantes funcionan como aditivos que son adicionados a los polímeros para mejorar sus propiedades; el plastificante interactúa con las cadenas del polímero a nivel molecular para acelerar su respuesta viscoelástica o aumentando la movilidad de la cadena. Existen también plastificantes especiales que también aportan características como retardante de llama, flexibilidad a baja temperatura o resistencia a condiciones climáticas.

Los plastificantes son clasificados según su composición química; a nivel industrial existen muchos tipos de plastificantes dentro de los que se encuentran sulfonatos de alquilo, adipados, parafinas cloradas, citratos, azelatos, epóxidos, glicol éteres y sus ésteres, aceites de hidrocarburos, ftalatos, también existen polímeros que son empleados como plastificantes como polibutenos, ricinoleados, sebacatos, sulfonamidas, del mismo modo hay plastificantes que son empleados para fines específicos tales como los derivados de difenilo usado como plastificantes secundario para PVC; estearato de calcio útil como lubricante de muchos polímeros, agentes de liberación, etcétera; dióxido de carbono permite reducir la viscosidad, temperatura de proceso o aumentar la tasa de flujo, sin afectar las propiedades finales del producto, siendo un ejemplo de los llamados plastificantes temporales que pueden ser eliminados o reaccionan durante el proceso que forma componentes no volátiles y no migratorios de una mezcla; derivados de materias primas naturales adecuados en aplicaciones medicinales, industria farmacéutica y alimenticia entre otros que son utilizados con menor frecuencia. El plastificantes actúa lubricando el movimiento entre las moléculas y reduciendo su resistencia interna al deslizamiento (Braun, Cherdrón, & Ritter, 2001; Wypych, 2004).

En este proyecto se emplearán diversos plastificantes para la obtención de las biopelículas los cuales se describirán a continuación, destacando las propiedades que aportan al producto final.

- **Agua destilada**

El agua destilada (H_2O) es agua sometida al proceso de destilación para la eliminación de sales y otros componentes disueltos en esta (University, 2003). Es un compuesto líquido transparente, incoloro e inodoro con punto de ebullición de $100^{\circ}C$ y punto de fusión de $0^{\circ}C$, con una densidad de 1.00 g/cm^3 (temperatura ambiente de $20^{\circ}C$) (Destilada, Av, No, Apdo, & Desionizada, 2017).

Haciendo una comparativa entre los plastificantes empleados tanto en la industria como en algunas líneas de investigación el agua destilada es el compuesto de menor costo, de mayor facilidad de acceso, y de gran compatibilidad con el almidón, sin embargo, cuanto mayor sea la relación en peso de la mezcla agua destilada-almidón más afectaciones tendrán las propiedades mecánicas del almidón termoplastificado (Sriroth, Chollakup, & Piyachomkwan, 2016).

- **Glicerol o glicerina**

El glicerol ($C_3H_8O_3$), llamado comercialmente como glicerina, es un alcohol que posee tres grupos hidroxilos, identificado también con los nombres 1,2,3-trihidroxipropano o 1,2,3-propanotriol, el glicerol es un compuesto inofensivo y de aplicación segura en seres humanos (De, Qu, & Org, 2017).

Es un compuesto líquido aceitoso transparente, incoloro, inodoro, con puntos de fusión y ebullición de 18.17°C y 290°C , respectivamente, con una densidad de 1.26 g/cm^3 a 20°C ; además al poseer tres grupos hidroxilo lo hace muy soluble en agua, etanol, acetona y acetato de etilo, e insoluble en aceites y/o grasas, adicional a esto, el glicerol no es inflamable ni combustible, ni explosivo (Seguridad et al., 2017).

El 70% del glicerol se deriva como subproducto en la obtención de biodiesel actualmente (De et al., 2017).

Al igual que el agua destilada el glicerol es ampliamente usado como plastificante en diversos estudios de obtención de biopolímeros termoplastificados, debido a su acción como lubricante que aporta movilidad a la estructura polimérica del almidón, presentando mayor flexibilidad y elongación (Jiménez-munguía, 2012), retarda el proceso de retrogradación de los productos finales (Carrera, 2009).

- **Urea**

La urea $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$, también conocida como carbonildiamida, es empleada en la industria agropecuaria como fertilizante, en aplicaciones industriales, en manufactura de químicos, en industria farmacéutica, entre otros, de aspecto sólido, color yeso, casi sin olor, puede desarrollar paulatinamente olor a amoníaco, es un compuesto con punto de fusión de 132.7°C y ebullición de 135°C , parcialmente soluble en metanol, éter dietílico e insoluble en n-octanol (Identificación, 2010). La urea es un compuesto nitrogenado, ya que el nitrógeno representa el 44% de su estructura, y su uso como plastificante permite que este

material se aplique al suelo sin causar daños ambientales, debido a que contiene nitrógeno este se libera lentamente en el suelo, nutriéndolo progresivamente. La urea tiene un efecto importante sobre los TPS, puesto que reduce o suprime la retrogradación del producto final (Carolina et al., 2017).

Muchos seres vivos producen la urea mediante un proceso de síntesis denominado ciclo de la urea propuesto por Hans Krebs y Kurt Henseleit en 1932, siendo la primera vía metabólica cíclica que se descubrió (Berg, Tymoczko, & Stryer, 2007). Lo que convierte la urea en un compuesto totalmente biodegradable.

1.1.3.1. Modelo empírico Moorshead

Un enfoque empírico para explicar la acción de los plastificantes fue propuesto por Moorshead, la cual predice que tipo de plastificante se debe emplear para una función específica. Moorshead planteo los requisitos para que un polímero logre plastificar,

- Para poder resistir la separación entre las cadenas del polímero provocada por el uso del plastificante, es necesario que el polímero presente cadenas extensas.
- En polímeros que presenten estructuras altamente reticuladas y cristalinas, en ambos casos las fuerzas de unión son muy fuertes impidiendo que el plastificante penetre en el polímero (Beltran & Marcilla, 2012).

Para lograr una buena compatibilidad y flexibilidad del material es fundamental contar con grupos polares y no polares en un plastificante (Wypych, 2004).

1.1.4. Mecanismos de degradación de polímeros

Los polímeros al degradarse pueden sufrir cambios físicos o químicos. Los cambios físicos consisten en decoloraciones, pérdida de brillo, formación de grietas, pérdida de propiedades mecánicas, superficie erosionada y/o pegajosa, por otro lado, en los cambios químicos se presentan ruptura de cadenas, reacciones de entrecruzamiento, etcétera. Los polímeros de menor peso molecular tienden a degradarse con mayor rapidez, en cuanto a los polímeros con peso molecular superior una manera de aumentar la degradación ambiental es combinar grupos funcionales fotosensibles e hidrolizables.

Los factores que tiene incidencia en la velocidad de degradación de los polímeros son: condiciones del medio, ya sea, temperatura, humedad, pH; características del polímero, tales como, susceptibilidad a la hidrólisis, estereoquímica, peso molecular, superficie específica, temperatura de transición vítrea y de fusión, presencia de monómero residual o aditivos, distribución de la secuencia; y características de los microorganismos, como su variedad, cantidad, fuente y actividad (Biom & Biodegradables, 2016).

Existen diversos tipos de degradación entre los que se encuentra la degradación térmica, degradación química y biodegradación entre otras de menor relevancia (Biom & Biodegradables, 2016).

1.1.4.1. Degradación térmica

La temperatura tiene incidencia directa en la vida útil de los materiales poliméricos, cuando estos se encuentran a temperaturas inferiores de la temperatura de transición vítrea, T_g , no se presentan movimientos moleculares, por ello, la degradación es lenta, caso contrario cuando se presentan temperaturas superiores a la T_g , donde se favorecen los procesos de degradación, que involucran ruptura de los enlaces covalentes o grupos laterales. Algunos polímeros al ser sometidos a elevadas temperaturas se degradan en sus monómeros. Por lo tanto, estudios recientes sobre el desarrollo de polímeros están encaminados a la obtención de polímeros termoestables los cuales no pierden sus propiedades con un aumento de calor (Biom & Biodegradables, 2016; Gonz, n.d.).

1.1.4.2. Degradación química

Este tipo de degradación se produce por agentes químicos como oxígeno, ozono, ácidos y agua, dentro de las que se destacan la degradación oxidativa y degradación por hidrólisis.

- **La degradación oxidativa**, se origina por oxidantes que se encuentran en la atmósfera como el oxígeno y el ozono, los cuales producen cambios en las propiedades mecánicas y eléctricas de los polímeros, donde la resistencia de estos a la oxidación está directamente relacionada con la estructura química. Los elastómeros muestran mayor sensibilidad a los agentes oxidantes, ya que, sus enlaces tienen insaturaciones o dobles enlaces, mientras que compuestos como el poliestireno, policarbonato entre otros, son más resistentes a la degradación oxidativa por presentar cadenas saturadas.

- **La degradación por hidrólisis**, se presenta por la interacción de los polímeros con agua y ácidos o bases fuertes. La susceptibilidad a la hidrólisis disminuye si en los carbonos de los grupos hidrolizables es incorporado un grupo alquilo. Estas reacciones solo tienen lugar si los ácidos y bases fuertes funcionan como catalizadores (Biom & Biodegradables, 2016).

1.1.4.3. Biodegradación

La biodegradación es producida por la labor enzimática de microorganismos que causa cambios en la estructura molecular del polímero. El grado de biodegradación está ligado a la geometría del polímero producido (Carrera, 2009). Se puede presentar una biodegradación parcial o total; la biodegradación parcial consiste en la pérdida de la organización molecular y propiedades del material, por su parte, con la biodegradación total los polímeros se convierten en compuestos simples al romperse las cadenas de carbonos, tales como dióxido de carbono, agua, sales minerales, metano (bajo condiciones anaeróbicas) y nueva biomasa, por acción de la actividad biológica enzimática de bacterias y demás microorganismos descomponedores (Pratt et al., 2017).

1.1.5. Polímeros biodegradables

Los llamados biopolímeros se pueden clasificar mediante su proceso de producción en: biopolímeros a partir de recursos naturales, biopolímeros a base de petróleo o sintéticos y biopolímeros a partir de fuentes mixtas, ejemplos de estos se encuentran en la figura 1 (Eduardo & Alzate, 2016), donde los polímeros a partir de recursos renovables pueden sintetizarse de plantas, ejemplo de estos es el PLA por medio de la fermentación y almidón, y bacterias encontrando el PHA. Dentro de los polímeros biodegradables de origen sintético se encuentra poliésteres sintéticos como el PLA obtenido a través de síntesis química y PCL, siendo el PLA muy competitivo entre los polímeros biodegradables en diversas aplicaciones por sus bajos costos de producción, alta tenacidad mecánica, rigidez y resistencia al agua (Pratt et al., 2017); y las mezclas son el resultado de la búsqueda del mejoramiento de las propiedades tanto física como químicas de los materiales disponibles en las otras categorías.

Los biopolímeros derivados de polisacáridos y proteínas tienen propiedades mecánicas deficientes, muy a pesar de que no son tóxicos, tienen bajos costos y poseen la capacidad de interactuar con células vivas. Sin embargo, se emplean en aplicaciones médicas: el colágeno, quitina/quitosano, alginato, queratina, fibrina, ácido hialurónico, albumina, almidón, celulosa y pectina. Es de resaltar que, el almidón es el más hidrofílico de los polímeros biodegradables a consecuencia de los grupos hidroxilo que estas disponibles para la unión de hidrógeno. En cuanto a los polímeros producidos a partir del petróleo tiene buenas propiedades mecánicas, pero una gran variedad de estos no es biodegradable (Eduardo & Alzate, 2016; Pratt et al., 2017).

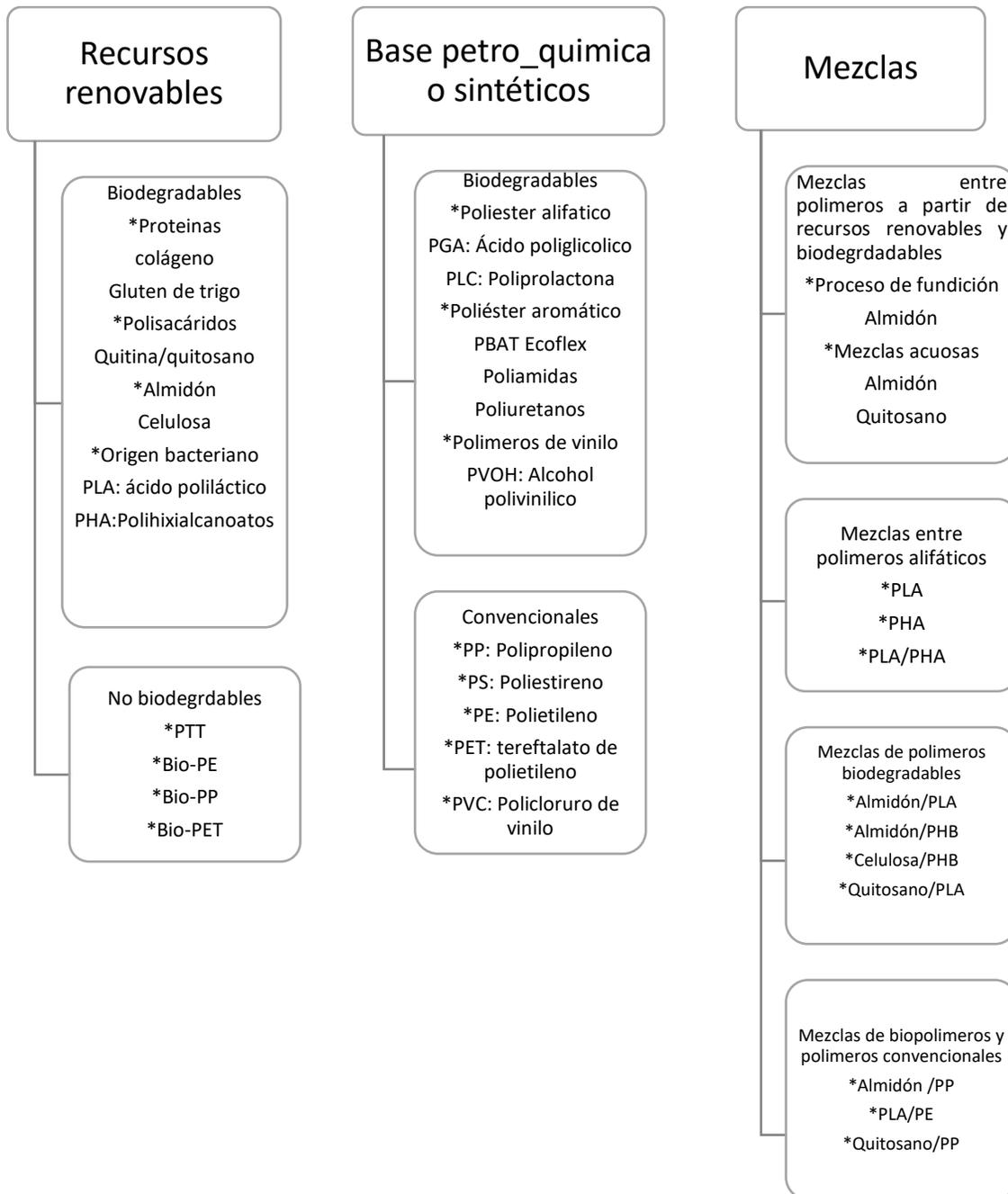


Figura 1. Clasificación de los polímeros termoplástico según el método de producción, biodegradabilidad y mezclas, con algunos ejemplos por cada clasificación. Fuente: Adaptado de (Eduardo & Alzate, 2016).

Es importante tener en cuenta que, todos los polímeros naturales y los monómeros por los que se encuentran constituidos son biodegradables, sin embargo, esta propiedad desaparece si las materias primas de las cuales proceden son sometidas a modificaciones químicas como la polimerización (Ventures, 2007).

La velocidad de degradación de los polímeros está directamente relacionado con su estructura química (funcionalidad) y propiedades físicas (morfología), propiedades mecánicas y térmicas, etcétera (Göktürk & Erdal, 2017).

En este trabajo se abordarán los polímeros biodegradables mencionados y ejemplarizados en la figura 1.

Polímeros biodegradables a partir de recursos renovables.

1.1.3.1 Proteínas.

Las proteínas aportan estructura y actividad biológica a muchos seres vivos como plantas y animales, donde la mayoría de las moléculas proteínicas están constituidas por 100 a 500 aminoácidos, estos se conectan mediante enlaces amida hidrolíticamente estables, por esta razón estos compuestos se degradan a través de mecanismos enzimáticos (Zhang, Ortiz, Goyal, & Kohn, 2014). De acuerdo al orden en que se unen los aminoácidos (estructura primaria) para constituir cadenas poli-peptídica, estas constituirán varias organizaciones espaciales sobre su eje (estructura secundaria) que logran su estabilidad por medio de puentes de hidrogeno. Las estructuras terciarias son las organizaciones de cadenas poli-peptídica en la cual se tienen uniones con puentes de hidrogeno, de van der Waals, interacciones electroestáticas e hidrofóbicas y puentes disulfuro, que en conjunto forman disposiciones proteínicas globulares y fibrosas. Por último, las estructuras cuaternarias son la asociación de diversas cadenas poli-peptídicas que se unen por enlaces no covalentes dando origen a moléculas únicas. Se ha enfocado el estudio de diferentes proteínas tanto de origen animal dentro de las que se encuentran proteínas de suero de leche, albuminas, colágeno, gelatina, queratina, entre otras, así como vegetal de las que se pueden citar el gluten de trigo, zeínas, soya, girasol, algodón, amaranto, maní, arroz, arveja, sorgo, pistacho y lupino; por su capacidad de originar películas biodegradables (Echeverría, 2012).

1.1.5.1. Polisacáridos

Los polisacáridos se encuentran ampliamente en la naturaleza, dividido en tres grupos: Polisacáridos estructurales, polisacáridos hidrófilos, polisacáridos de reserva, los estructurales le aportan estabilidad a las células y órganos, los hidrófilos son los encargados de evitar que células o tejidos pierdan humedad y los polisacáridos de reserva

son los responsables de almacenar hidratos de carbono liberándolo cuando los monosacáridos lo requieran (Koolman & Rohm, 2004). Dentro del grupo de los polisacáridos se encuentra el almidón, celulosa, quitina, alginatos, pectina, etcétera, polisacáridos que tienen variadas aplicaciones entre las que se destaca su uso como polímero base en películas biodegradables (Vigil, 2013).

1.1.5.2. Almidón

El almidón en la arracacha se presenta como una alternativa en la producción de biopolímeros, el cual participa activamente en el metabolismo de las plantas como reserva de carbohidratos, a pesar de que el almidón procedente de fuentes vegetales es químicamente similar, el peso molecular, la disposición molecular y forma granular varían de acuerdo al origen (Smith & Ristol, 1972) en lo cual hace que varía aspecto como el tamaño de los gránulos que van desde 1 – 100 μ m de diámetro, forma (redonda, lenticular, poligonal) (Tester, Karkalas, & Qi, 2004), lo que afecta aspectos como calidad y composición. El almidón se puede extraer de frutos, semillas, hojas y tubérculos, encontrándose en la naturaleza en forma de gránulos, compuestos por una mezclas de polisacáridos, formando capas de macromoléculas, las cuales en su exterior contienen amilopectina y las capas internas amilosa (Carrera, 2009). Los almidones se generan a partir del agua y el dióxido de carbono a través de la fotosíntesis en las plantas (K. A. Ibrahim, Naz, Sulaiman, & Ghaffar, 2017), además es usado en alimentos, cosméticos, papel, textiles y en algunas industrias como agente adhesivo, espesante, estabilizador, endurecedor y gelificante (Tako, Tamaki, Teruya, & Takeda, 2014).

Los almidones en su mayoría contienen aproximadamente 20% de amilosa y el 80% restante es amilopectina, sin embargo, existen los llamados almidones cerosos que están constituido completamente por amilopectina. Las moléculas de amilosa son un conjunto de moléculas de glucosa unidas por enlaces glicosídicos α -1,4 (figura 2), no obstante, algunas moléculas de amilosa tienen enlaces glicosídicos α -1,6, representando ramificaciones en la cadena principal (Outline, 2019), además tienen alrededor de 200 a 20,000 de estas, en cadenas no ramificadas o enrolladas en forma de hélice. La amilosa es soluble en agua caliente gracias a una formación de suspensión coloidal, e insoluble en agua fría (Avil & Ruiz, 2005). Por lo general, el peso molecular de la amilosa que procede de tubérculos es mayor que dichas moléculas procedentes de los cereales (Pedro & Mostacero, 2001).

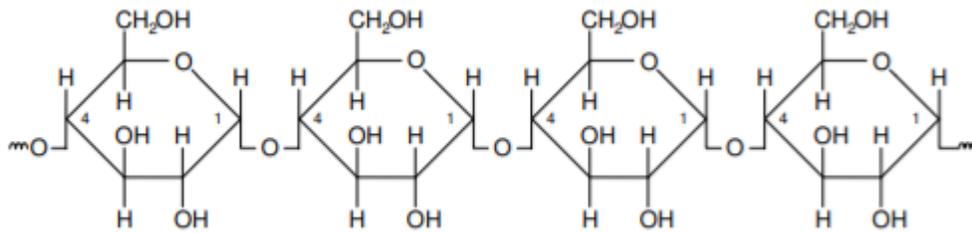


Figura 2. Estructura de una molécula de amilosa. Fuente: (Avil, 2006)

Por otro lado, las moléculas de amilopectina presentan una estructura ramificada con enlaces glicosídicos α -1,4 y α -1,6, (figura 3), donde cada una de las cadenas de moléculas de amilopectina tienen la misma conformación de α -hélice a la derecha que las moléculas de amilosa, siendo las moléculas de amilopectina significativamente más grande que las de amilosa. La relación entre las cadenas largas y cortas de la amilopectina, suelen ser un factor determinante de las propiedades del almidón. Por su parte, el almidón sufre el proceso de hidrólisis lo cual lo convierte en azúcares durante la maduración ya sea, de frutos, semillas y/o tubérculos, en el caso de los tubérculos desarrollan un fenómeno conocido como endulzamiento, donde el almidón se convierte en fructosa, glucosa y sacarosa, siendo la glucosa a menudo la que se presenta en mayor cantidad (Avil, 2006; Outline, 2019).

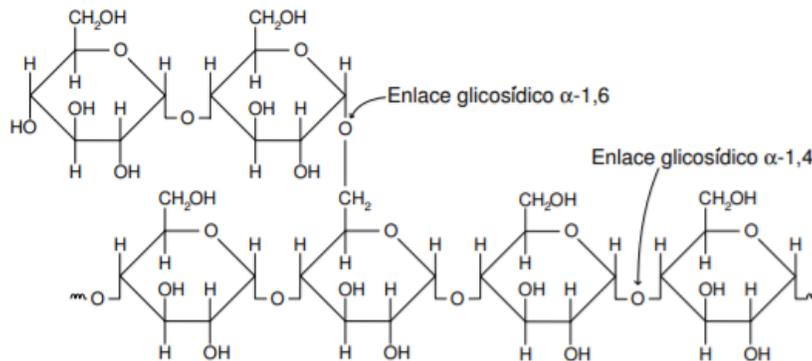


Figura 3. Segmento de una molécula de amilopectina. Fuente: (Avil, 2006)

El amiloplasto es un organelo de células vegetales en el cual las moléculas de almidón se sintetizan. Debido a la acción de las enzimas de síntesis las moléculas que se forman en el amiloplastos se combinan entre sí para formar una masa semicristalina ordenada y compacta. La región de moléculas ordenadas continua en crecimiento en dirección radial desde el centro, llamado hilio, las ramificaciones agrupadas se presentan en doble hélice

compacta (figura 4). La resistencia y propiedades mecánicas del almidón, dependen de la relación entre la amilosa y amilopectina. Debido a su estructura molecular el almidón puede comportarse como un material termoplástico (Outline, 2019).

Dentro de las aplicaciones que se le dan al almidón termoplástico se encuentran las películas para bolsas y mantillo, materiales espumados usados como rellenos para embalaje, bandejas y platos desechables (Ventures, 2007).

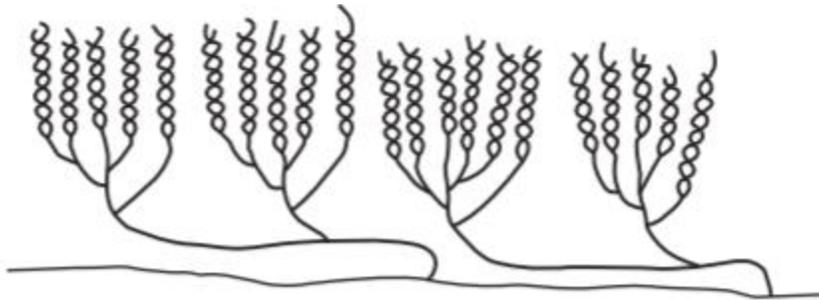


Figura 4. Esquema de segmento de la molécula de amilopectina. Fuente: (Outline, 2019).

En cuanto al almidón procedente de la arracacha los valores con respecto a los porcentajes de amilosa y amilopectina reportados varían entre 4.33-31% y 70.00-95.67%, respectivamente, estos porcentajes presentan cambios de acuerdo a la variedad de arracacha estudiada, en la arracacha amarilla se encuentra alrededor de 10.33% de amilosa y 89.67% de amilopectina, en la blanca es aproximadamente 19.17% de amilosa y 80.83% de amilopectina y por último, en la morada la amilosa representa el 29%, mientras que la amilopectina el 80%, siendo valores significativos con respecto a otros tipos de tubérculos pues la arracacha se destaca por su alto contenido de amilopectina (Salas Cuevas, 2018).

- **Proceso de gelatinización del almidón.**

En la gelatinización o gelación, el agua se incorpora en los gránulos de almidón cuando la mezcla se somete a un aumento de temperatura progresivo, alcanzando determinada temperatura crítica, donde los gránulos sufren el proceso de hinchamiento perdiendo su estructura cristalina, produciendo un aumento en la viscosidad de la mezcla que posteriormente se recrystaliza al disminuir la temperatura, a su vez, si en el proceso de

calentamiento se expone la mezcla a elevadas temperaturas se puede degradar el almidón (Carrera, 2009; Hernandez, 2003).

El proceso de gelatinización tiene lugar debido a la formación de asociaciones intra e intermoleculares, en la que los grupos hemiacetal de oxígeno, hidroxilo o metilo de los residuos de azúcar de los polisacáridos contribuyen al enlace de hidrogeno o las fuerzas de atracción de van der Waals. (Tako et al., 2014). La temperatura de gelatinización es característica de cada variedad de almidón, produciéndose en un rango específico de acuerdo a la procedencia del almidón ya sea, frutas, vegetales, tubérculos, etcétera.

Cuando ocurre la absorción de agua y un aumento del volumen también se presenta un crecimiento en la viscosidad de la muestra hasta que alcanza un máximo conocido como pico de viscosidad, donde el granulo se fragmenta y las moléculas de amilosa y amilopectina se difunden. Cuando se alcanza la máxima viscosidad también se logra el mayor hinchamiento, en el cual las moléculas de la suspensión se dispersan y se forman el conocido engrudo o pasta. El proceso de gelatinización es irreversible. Cuando la temperatura a la que se somete la suspensión excede la temperatura de gelatinización de esta, los enlaces de hidrogeno del almidón se siguen rompiendo, y las moléculas de agua se incorporan a los hidroxilos libres y así continua el proceso de hinchado hasta presentar degradación (Aristizábal & Sánchez, 2007).

- **Celulosa**

La celulosa es el constituyente principal de paredes celulares de las plantas, es una capa rígida localizada en el exterior de la membrana plasmática, que al ser observada en el microscopio tiene una apariencia análoga a un cabello humano, de acuerdo a variedad de árbol su longitud y espesor cambia. La celulosa tiene una estructura similar al almidón, pero a diferencia de este último, las moléculas de D-glucosa en la celulosa se enlazan por $\beta(1,4)$ -glucosídica, lo que le proporciona propiedades diferentes a estos dos compuestos poliméricos, como por ejemplo la celulosa es completamente insoluble en agua, mientras que el almidón es soluble. La celulosa se genera en las plantas continuamente por medio del proceso de fotosíntesis, siendo una fuente de glucosa inagotable. Por otro lado, la celulosa fue el primer polímero que sufrió modificaciones para conseguir diferentes polímeros de utilidad comercial, estos cambios se producen en su estructura química por medio de la conversión de los grupos hidroxilo en otros grupos funcionales (Beyer & Walter, 1987; Ege, 2004; Estrada, 2011).

1.1.5.3. Origen bacteriano

Los biopolímeros de origen bacteriano son obtenidos por medio de microorganismos ya sea bacterias, hongos o algas, en el caso de las bacterias estas producen el biopolímero cuando son sometidas a estrés, en un exceso de carbono y algún nutriente esencial como oxígeno, nitrógeno o fósforo, el polímero se produce como una reserva de carbono en forma de gránulos intracelulares, este proceso se hace en un biorreactor para fermentación, en la mayoría de los casos los microorganismos empleados son modificados genéticamente para que sean capaces de metabolizar y así aumentar la eficiencia del proceso y las propiedades del material resultante (Liliana, Docente, Yory, & Docente, 2018).

- **PLA: Acido poliláctico**

Es un poliéster alifático de amplia aplicación en la industria de alimentos, envases y medicina debido a su propiedad de ser biodegradable. Su monómero el ácido láctico es producido por medio de fermentación de materias primas de origen vegetal como la papa y el maíz, usando microorganismos como la *Escherichia Coli*. La mayor parte de los PLA producidos a nivel industrial son producidos por polimerización de anillo utilizando extrusión reactiva de un solo paso. Este polímero muestra una alta competitividad entre los polímeros biodegradables por tener un bajo costo de producción, alta resistencia mecánica y resistencia al agua, pero en comparación con los costos de producción de los plásticos convencionales su costo de obtención es 20% mayor, es de resaltar que el PLA es resistente a procesos térmicos de extrusión y formado aún más que ciertos polímeros convencionales (Vigil, 2013). No obstante, los homopolímeros de PLA a temperaturas superiores a 200°C pueden sufrir degradación térmica por hidrólisis, con temperaturas de fusión de aproximadamente 175°C (Pratt et al., 2017). Los PLA presentan limitaciones en cuanto a su resistencia a altas temperaturas y traslucidez (Vigil, 2013).

- **PHAs: Polihidroxicanoatos**

Son poliésteres obtenidos por medio de más 300 especies de bacterias (Pratt et al., 2017) que se concentran como inclusiones supramoleculares. Gracias a su amplia variedad de estructuras se han clasificados más de 150 tipos de PHAs, que pueden ser categorizados según la frecuencia de aparición naturaleza química de los monómeros, tamaño de la unidad monómera siendo de cadena corta (3 y 5 carbonos), cadena media (6 y 12 carbonos) y cadena larga (más de 12 carbonos); de origen sintético y tipos de monómeros

en los PHAs. Los PHAs presentan dos características muy importantes: son biodegradables y son biocompatibles, adicional a esto son termoplásticos, piezoeléctricos y su elasticidad varia, son hidrofóbicos, impermeables a los gases, otra propiedad que resulta ser muy útil es la modificación y diseño de su estructura por medio de la ingeniería genética (Luengo, 2018). Sin embargo, el precio en el mercado de este polímero se considera alto en comparación con los costos de los polímeros convencionales como el polipropileno y polietileno, el homopolímero más común del PHAs es el polihidroxibutirato (PHB) (Pratt et al., 2017).

Polímeros biodegradables a base del petróleo o sintéticos.

1.1.5.4. Poliéster alifático.

- **PGA: Acido poliglicólico**

Es el poliéster alifático lineal más sencillo de origen sintético (Castillo, 2005), y tiene estructura altamente cristalina. El PGA es ampliamente usado en aplicaciones biomédicas por su alta biodegradabilidad y biocompatibilidad (Göktürk & Erdal, 2017), como en suturas sintéticas reabsorbible conocido comercialmente como Dexon, que es empleado en tejidos blandos y ligaduras, donde las suturas de PGA pierden alrededor del 50% de su fuerza luego de dos semanas de ser insertadas y el 100% en las cuatros semanas, sin embargo, está prohibido su uso en cirugía cardiovascular y neurocirugía (Fuller Kotcher, 2009). El PGA puede ser producido por policondensación de ácido glicólico, polimerización de apertura de anillo glicólido, policondensación de estado sólido de halogenoacetatos y polimerización de ácido de Brønsted de monóxido de carbono y formaldehido (Göktürk & Erdal, 2017).

- **PLC: Policaprolactona**

Es un poliéster obtenido por medio de la polimerización por apertura del anillo de la caprolactona, derivado del petróleo que a pesar de centrar su origen de un recurso no renovable y adicionalmente se produce sintéticamente, el PLC es biodegradable (Adewale & Olabisi, 2016), que presenta un amplio rango de degradación, cerca de los dos años (Castillo, 2005). El PLC se usa en aplicaciones de vida útil corta, su punto de fusión es bajo entre 58 a 60°C, convirtiéndolo un producto adecuado para compostajes como medio de eliminación (Kumar & Sonia, 2016). Este biopolímero es altamente miscible, se mezcla fácilmente con otros polímeros, funde con facilidad y no es toxico, otra ventaja de este

compuesto es que se puede adicionar a otros biopolímeros para mejorar las propiedades mecánicas, biodegradabilidad y compatibilidad en una amplia gama de polímeros (Ashter, 2016), además el PLC es resistente al agua, aceite, solventes y cloro (Adewale & Olabisi, 2016). Existen muchos tipos de biopolímeros que son sintetizados a partir del petróleo como se ven en la figura 1, sin embargo, el PCL, PLA y PGA son los de mayor desarrollo.

1.1.5.5. Poliéster aromático

Existe un amplio grupo de poliéster aromáticos biodegradables de origen petroquímico dentro de los que cabe destacar PBAT Ecoflex, las poliamidas y poliuretanos.

- **PBAT: Poly (butylene adipate-co-terephthalate)**

El PBAT es un copolímeros aromático biodegradable de adipato de butileno y tereftalato (Tunkasiri, 2012), obtenido por policondensación de 1,4-butanodiol, tereftalato de metilo y ácido adipico, empleando como catalizador ortotitanato de tetrabutilo. El PBAT muestra diversas propiedades como alta elasticidad, resistencia al desgaste, fractura, agua y aceites, y una completa biodegradabilidad en condiciones de compostaje; su biodegradabilidad se da gracias al grupo adipato de butileno y sus propiedades mecánicas y de estabilidad al grupo tereftalato. Los productos de PBAT más representativos presentes en el mercado son el Ecoflex y Origo-Bi. PBAT Ecoflex está diseñado para ser procesado como polietileno de baja densidad (LDPE), su principal aplicación es en bolsas para desechos o envases desechables, debido a su rápida descomposición sin dejar ningún residuo. Sin embargo, los altos costos de producción, y su procedencia de recursos fósiles no renovables hacen que este polímero tenga amplias aplicaciones limitadas (Niaonakis, 2015).

- **PA: Poliamidas**

Las poliamidas conocidas comúnmente como nylons o nilones, son polímeros cuyos monómeros son el grupo amida (-CONH-), se consideran un material con alto potencial para la obtención de polímeros biodegradables, dado a su contenido de nitrógeno, nutriente esencial para el desarrollo de muchos microorganismos (Biom & Biodegradables, 2016).

Estos polímeros son los que mejor se ajustan al uso biomédico, no obstante, su resistencia a la hidrólisis del grupo amida, su gran número de puentes de hidrogeno y su cristalinidad, le proporciona una pobre capacidad de degradación a corto plazo, sin embargo, estas

mismas propiedades le conceden buenas propiedades mecánicas, pero se ha avanzado en modificaciones químicas las cuales le otorga a las poliamidas la propiedad de biodegradación como el desarrollo de copolímeros y de poliamidas segmentadas (Biom & Biodegradables, 2016; M. Perez & Perez, 2010).

- **Poliuretanos**

Los poliuretanos son compuestos poliméricos sintetizados por medio de adición por pasos, en los que reaccionan por medio de policondensación dos tipos de monómeros como lo son dioles y diisocianatos saturados, que desde su descubrimiento es uno de los materiales sintéticos con mayor producción a nivel mundial. Los poliuretanos, tienen una alta resistencia a la tracción y altos puntos de fusión; adicional a esto su resistencia a la degradación natural o química, lo convierte en una alternativa al uso de plásticos, por su dureza, elasticidad y resistencia a la abrasión, se emplean como material de construcción, en la fabricación de juguetes, la industria automovilística, etcétera.

En la obtención de poliuretanos biodegradables se explota la síntesis de carbohidratos modificados y el control de la polimerización, por lo cual este tipo de materiales se presentan como una opción en la industria médica, en catetes, bolsas para sangre, prótesis para fijadores ortopédicos, marcapasos, entre otros (Gregori et al., 2007; Torres, Manuel, Adileily, & A, 2019).

1.1.5.6. Polímeros de vinilo

- **PVOH: Alcohol polivinílico**

El alcohol polivinílico también se conoce con el nombre de polietenol, es un polímero de origen sintético, que comúnmente se confunde con acetato de polivinilo, un reconocido pegamento de madera. El PVOH es obtenido del acetato de polivinilo por medio de alcoholólisis parcial o total para sustituir los grupos acetato, catalizado por un ácido o una base (E. Sanchez & Alvarado, 2015). Es un polímero altamente polar, lo que le proporciona una fracción cristalina amplia (Perilla, 1998). El PVOH es completamente biodegradable, además no funde como un termoplástico, sino que se desintegra por pérdida de agua de dos grupos hidroxidos a temperaturas que exceden a 150°C.

El alcohol polivinílico posee muchas propiedades que hacen un polímero de amplia aplicación industrial como en la alimentaria como agente aglutinante y de recubrimiento,

también es utilizado como agente de recubrimiento de películas en donde se requiere protección contra la humedad entre otras aplicaciones (FAO, 2004).

Como antes se mencionó existen diversos frutos, cereales, tubérculos entre otros cuyas estructuras están compuestas por polímeros naturales como lo es el almidón, este estudio centrará su interés en la arracacha variedad amarilla de la cual se extraerá parte del almidón que esta contiene y así obtener un biopolímero con mejores propiedades.

1.2. La arracacha

1.2.1. Generalidades

La arracacha (*Arracacia xanthorrhiza*) es un tubérculo de porte herbáceo que alcanza 1,5 m de altura (DANE, 2015) que centra sus orígenes en la región andina, en países como Perú, Bolivia, Colombia, Ecuador y Venezuela (figura 5), siendo el cultivo más antiguo de sur América. De acuerdo a la región recibe diversos nombres vernaculares: Racacha, Virraca y Arracacha en Perú; Zanahoria blanca en Ecuador; Racacha, Racachu y Lacachu en Bolivia; Arracacha en Colombia (Dos Santos, 2004); en Venezuela como apio criollo (Ochoa, 2010). Es una planta herbácea que cuenta con dos partes una aérea y otras subterránea (figura 6), las hojas presentan de tres a cuatro folíolos laterales opuestos y uno terminal, en la parte subterránea se desarrolla una raíz tuberosa, estas raíces pueden ser ovoides, cónicas o fusiformes, se puede encontrar en diversas variedades: amarilla, blanca y violeta (Rana & Kumar, 2017).

- Amarillas: Presenta una raíz amarilla, este tipo pertenece a la variedad yema de huevo. Dentro de esta se presentan dos formas: una planta que presenta un color violeta en la base de los peciolo y la otra muestra un color rosado. Este grupo de raíces presentan el ciclo vegetativo más extenso, tienen mayor resistencia a condiciones climáticas adversas y generan raíces de mayor tamaño.
- Blancas: Tiene raíces blancas; tienen menor tolerancia a las variaciones climáticas, con raíces con tamaños más pequeños.
- Violeta: muestra zonas violetas entre las raíces amarillas y blancas (Rana & Kumar, 2017; Rivera Varón et al., 2015).

La raíz puede tener una forma recta o encorvada, aplanado en la parte superior debido a la presión que ejercen los tubérculos en la corona o cepa y finalizado en un apice delgado

con fibras de poca longitud. El tubérculo se encuentra recubierto por una delgada capa casi lisa, que presenta aberturas o cicatrices transversales, similar a las raíces de las zanahorias (Virtual, 2005).



DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA DE LA ARRACACHA 

Figura 5. Distribución de las zonas de cultivo de la Arracacha en la cordillera de los Andes. Fuente: (Virtual, 2005).

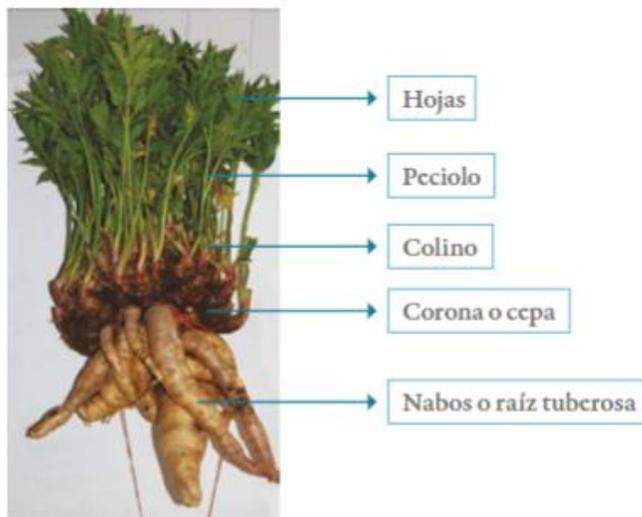


Figura 6. Planta de arracacha con partes aéreas y subterráneas con sus respectivas partes. Fuente: (Rivera Varón et al., 2015).

1.2.2. Producción de arracacha en Colombia

Colombia es el primer productor a nivel mundial de este tubérculo con una producción comercial de aproximadamente 8342 hectáreas cultivadas, destacándose el municipio de Cajamarca, Tolima con la mayor producción en el país (Cuad, 2011). De acuerdo, a las cifras presentadas por el ministerio de agricultura de Colombia, la producción de arracacha en los últimos 10 años ha presentado un crecimiento en la producción y áreas cultivadas (fig. 3), donde en los años 2011 al 2015 muestra un comportamiento relativamente estable en las áreas cultivadas, presentando un pequeño descenso en el año 2016, sin embargo, para los años 2017 a 2018 se ve reflejado un aumento exponencial, debido a las políticas de inversión en el agro colombiano.

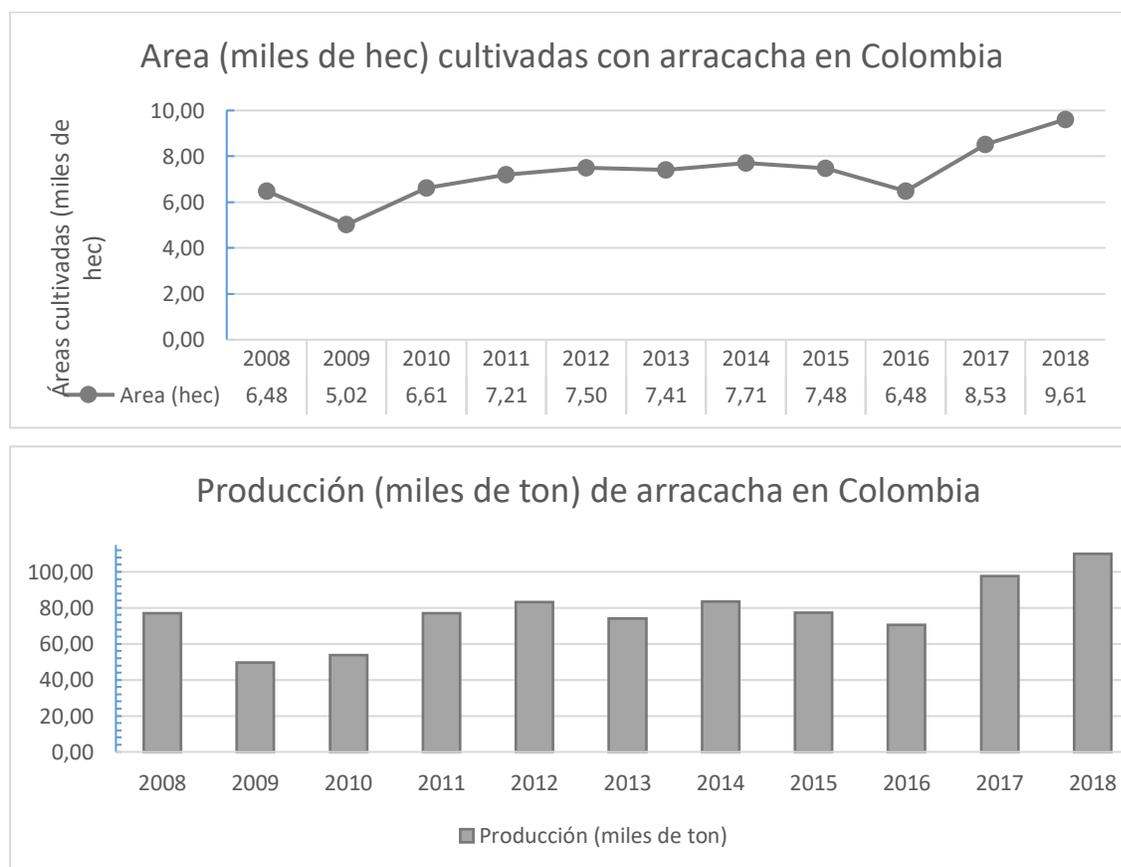


Figura 7. Figura superior, áreas de cultivos empleadas para la producción de arracacha en Colombia en los años 2008-2018. Figura inferior, Producción de arracacha en miles de ton/año en Colombia entre 2008-2018. Fuente: Adaptado de (Minagricultura, 2019).

Para la producción de arracacha se requiere unas condiciones climáticas, debido a la altitud en la que se produce, de acuerdo a la tabla 1, algunos departamentos muestran una

alta producción y otros muy baja producción, esto se ve favorecido por sus zonas montañosas y condiciones de terreno, siendo Tolima el departamento de Colombia con mayores zonas potenciales de cultivo, por esta razón tiene la más alta producción a nivel nacional.

Tabla 2. Área y producción nacional de arracacha por departamento.

DEPARTAMENTO	ÁREA (ha)	PRODUCCIÓN (ton)
ANTIOQUIA	13	181.6
BOYACA	981	11,649.20
CASANARE	23.06	149.5
CAUCA	349	3,015.40
CESAR	15	22.5
CUNDINAMARCA	533.5	5,199.00
HUILA	474	3,877.50
LA GUAJIRA	27	201
NARIÑO	345.5	1,209.50
NORTE DE SANTANDER	787.99	12,178.39
QUINDIO	1.24	2.48
RISARALDA	28.5	288
SANTANDER	118.5	921.9
TOLIMA	5,624.69	67,586.36
VALLE DEL CAUCA	289	3,572.00

Fuente: Agronet Ministerio de agricultura y Desarrollo Rural. 2019. Anuario estadístico del sector agropecuario 2018. Fuente: (Minagricultura, 2019).

1.2.3. Cultivo y cosecha

La arracacha puede ser cultivada sola o asociada a maíz, frijol o papa, aunque por lo general se siembra en rotación al cultivo de la papa, en muchos lugares por las condiciones de altura que necesita la planta, se siembra en zonas con pendientes muy pronunciadas y/o montañosas. Por otro lado, los cultivadores para acelerar la recolección del tubérculo, no permiten que la planta florezca. En cuanto a la plantación se colocan los colinos separados y sin ramas en los surcos, a una distancia de 60 a 80 cm entre estos (Virtual, 2005).

La arracacha puede ser cultivada en un rango de altitud de 200 a 3200 msnm, teniendo un mejor desempeño entre 1000 y 2000 msnm; en un rango de temperaturas de 15 a 25°C, de hecho, parece no tolerar periodos extensos con temperaturas superiores a 25°C, con

lluvias anuales entre 600 y 1000 milímetros; el cultivo se desarrolla en buenas condiciones en terrenos arenosos a franco arenosos, profundos, bien drenados, moderadamente ácidos con pH de 5 a 6 y ricos en materia orgánica, sin embargo se destaca su tolerancia a la sequía (DANE, 2015; Virtual, 2005).

Los tiempos de recolección del tubérculo están ligados a diversos factores como lo son la variedad, la altitud, las condiciones ecológicas y el manejo agronómico, por ende, el rango de tiempo del ciclo vegetativo entre la siembra y la cosecha puede variar de 8 a 18 meses. Por otro lado, los agricultores emplean estrategias de indicadores fisiológicos que les permite reconocer si el cultivo está apto para iniciar la cosecha, tales indicadores son el amarillamiento de las hojas, muestreo de las raíces para detallar su crecimiento y tamaño. Ahora bien, si se sobrepasa el tiempo de cosecha, en el cual la planta alcanza su madurez en alrededor de 4 a 5 meses, las raíces pierden su calidad tornándose fibrosas, lo que representa pérdida del cultivo (DANE, 2015).

1.2.4. Clasificación botánica

- División: *Spermatophyta*.
- Clase: *Magnoliophyta (Angiospermae)*.
- Sub-clase: *Rosidae*.
- Orden: *Umbellales (Ariales)*.
- Familia: *Umbelliferae (apiaceae)*.
- Sub-familia: *Apiodae*.
- Género: *Arracacia*.
- Especie: *Arracacia xanthorrhiza bancroft*. (Burgos Oliveros, Carlos Chávez Pereda, José Julca Hashimoto, & Amaya Robles, 2006)

1.2.5. Composición química.

La arracacha es un tubérculo rico en calcio, fósforo, hierro, niacina, vitamina A, piridoxina-B6, riboflavina-B2, ácido ascórbico, proteínas, fibras y carbohidratos (Rana & Kumar, 2017). Las proteínas presentes en la arracacha tienen por lo general deficiencia en la mayoría de sus aminoácidos esenciales (Burgos Oliveros et al., 2006).

Tabla 3. Composición química de la arracacha.

COMPONENTES	g/100 g DE MATERIA FRESCA	
	PROMEDIO	VARIACION
HUMEDAD	74	64.12 - 61.37
SÓLIDOS TOTALES	26	16.83 - 34.14
CARBOHIDRATOS	24.91	19.25 - 29.87
PROTEÍNAS	0.96	0.60 - 1.85
LÍPIDOS	0.26	0.19 - 0.35
CENIZAS	1.3	1.05 - 1.38
FIBRAS	0.85	0.60 - 1.24
ALMIDÓN	17.84	10.20 - 25.49
AZÚCARES TOTALES	1.66	0.65 - 1.98
CALORÍAS	104	96 - 126

Fuente: (Burgos Oliveros et al., 2006), (Adarve-Cobo & Mejia, 2012).

Tabla 4. Composición de las raíces y las cepas de acuerdo a la variedad de arracacha. (por cada 100 g de muestra).

COMPUESTOS	UNIDAD	RAIZ DE ARRACACHA AMARILLA	RAIZ DE ARRACACHA BLANCA	RAIZ DE ARRACACHA MORADA	CEPA DE ARRACACHA AMARILLA	CEPA DE ARRACACHA MORADA
AGUA	g	72.8	74.5	71.9	72.6	72
MATERIA SECA	g	27.2	25.5	28.1	27.4	28
CARBOHIDRATOS	g	24	22.3	24.9	24.1	24.8
PROTEINA	g	0.9	1	1.1	0.9	1
GRASA	g	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
FIBRA	g	1	0.7	0.8	1.1	0.9
CENIZAS	g	1.2	1.4	1.2	1.2	1.2
MINERALES						
CALCIO	mg	26	23	24	28	25
FÓSFORO	mg	60	40	65	70	70
HIERRO	mg	0.7	1.1	0.7	1.1	0.4
VITAMINAS						
VITAMINA A	U.I	190	10	20	69	3
TIAMINA	mg	0.06	0.05	0.04	0.07	0.06
RIBOFLAVINA	mg	0.04	0.06	0.03	0.09	0.05
NIACINA	mg	2.8	2.5	1.1	4.8	4.1
ACIDO ASCÓRBICO	mg	20	15	20	20	20
CALORIAS	unidades	100	94	104	100	104

Fuente: (Nacional & Agroindustriales, 2002).

En la tabla 3, muestra la composición química de la arracacha, la cual tiene un alto contenido de humedad siendo necesario retirarla para mayor rendimiento en el proceso de extracción del almidón, la variación está sujeta a un amplio rango de factores como el tipo de arracacha, condiciones de cultivo, tipo de terreno, altitud entre otros.

Observando la tabla 4, el análisis nutricional de la composición de las raíces y cepas con respecto al tipo de arracacha no tienen una variación muy significativa.

Un factor a tener en cuenta es la actividad enzimática de la peroxidasa en la arracacha la cual es responsable del pardeamiento que sufre el tubérculo al estar en contacto con el oxígeno presente en el aire, al ser sometido a golpes, pelado o cortado (Seminario, 2004).

El pardeamiento enzimático es una reacción química, a pesar de ser de carácter enzimático en sus primeras etapas, estas tienen como sustratos a compuestos fenólicos que se convierten en compuestos poliméricos, en su mayoría con coloraciones pardas, este fenómeno puede significar en algunos casos problemas de calidad en cuanto a la preservación de frutas, verduras y tubérculos, ya que afecta el color, sabor valor nutricional y seguridad del alimento (Cabezas Serrano, 2013). Sin embargo, la aparición de este pigmento no siempre se considera indeseable, en algunos casos se busca esta transformación de los compuestos fenólicos como lo son el secado de granos fermentados de cacao, fermentación de las hojas de té, entre otros. Los sustratos a partir de los cuales se dan las alteraciones químicas son aquellos con estructuras de monofenoles, ortodifenoles y polifenoles (J. Gutierrez, 2000). La mayor parte de las alternativas para reducir el pardeamiento se concentran en controlar la acción de la polifenoloxidasas (PPO) (Cabezas Serrano, 2013).

CAPÍTULO 2: METODOLOGÍA

2. Metodología

2.1. Selección del tubérculo y extracción de almidón

La arracacha (*Arracacia xanthorrhiza*) de tipo amarilla estudiada, fue seleccionada en la central mayorista de la ciudad de Pamplona, Norte de Santander, la cual se cultivada en el municipio de Toledo, Norte de Santander, ubicado alrededor de 1642 msnm, cuyas raíces fueron recolectadas al octavo mes de su etapa de crecimiento, con una maduración de aproximada del 70%. Para el proceso de extracción de almidón se tomó como referencia el método empleado por (Peroni, 2003), con algunas modificaciones.

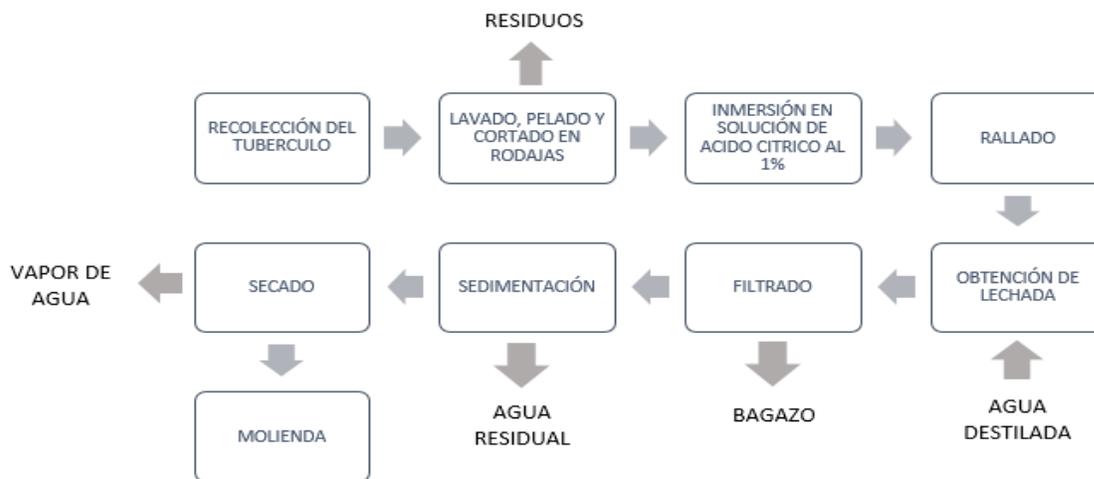


Figura 8. Esquema de la extracción del almidón a partir de la arracacha.

La extracción del almidón se realizó por vía húmeda; una vez recolectados los tubérculos fueron lavados, pelados y cortados en rodajas, a dichos trozos se les aplicó una solución de ácido cítrico al 1% para reducir el pardeamiento enzimático durante 30 minutos (García Méndez & Pacheco de Delahaye, 2007; Pacheco-Delahaye & Testa, 2005), posteriormente la arracacha fue rallada y pesada a la cual se le adicionó agua en una relación 1:3 y 1:10 sólido: líquido para evaluar qué proporción favorecía la extracción. La parte líquida (contiene el almidón) fue filtrada por medio de un tamiz de 200 mallas, eliminando el residuo sólido (bagazo). La lechada se dejó sedimentar por 12 h, el residuo decantado (almidón) se sometió a el proceso de secado a 40°C por 20 h, luego se maceró y pesó, (figura 8). El almidón obtenido se preservó en un recipiente para evitar la absorción de agua, puesto que se trata de un compuesto altamente higroscópico.

Para medir el rendimiento de la extracción se empleó la siguiente ecuación.

$$\%Rendimiento\ de\ la\ extraccion = \frac{Almidón\ extraido\ seco\ (g)}{Arracacha\ procesada\ (g)} * 100$$

2.2. Caracterización fisicoquímica del almidón de arracacha

2.2.1. Apariencia microscópica

Para observar la forma y tamaño de los gránulos de almidón de arracacha obtenido se utilizó un microscopio óptico marca olympus Japan, para el cual se disolvieron aproximadamente 10 mg de almidón seco en 1 mL de agua destilada; de esta solución se tomó una gota que fue extendida en una cámara de Neubauer. Las microfotografías de la forma y tamaño de los gránulos se observaron con el objetivo 10x y 40x (Pinto, 2012).

2.2.2. Determinación de pH

Se determinó el pH por medio del método planteado por (Aliaga & Sanchez, 2015) con modificación. Se preparó una solución de 25 ml de agua destilada con aproximadamente 5 g de almidón (base seca), se disolvió hasta obtener una solución totalmente homogenizada, previamente se estableció el pH con un pH-metro, introduciendo el electrodo en la muestra, esperando por aproximadamente 2 min a que la medición se estabilizara.

2.2.3. Determinación de humedad por pérdida de peso

En este ensayo se pesaron aproximadamente 1.5 g de material en un crisol de porcelana previamente tarado y pesado, sometiendo la muestra a un secado en horno a 110°C durante 8 horas (Acosta & Blanco, 2013). Los resultados se expresan en porcentajes mediante la siguiente ecuación

$$\%Humedad = \frac{A - B}{A} * 100$$

Donde:

A: Peso en g de la muestra sin el peso del crisol

B: Peso en g de la muestra sin el peso del crisol después del secado.

2.2.4. Determinación de cenizas totales (calcinación)

Se empleó el método planteado por Kirk con algunas modificaciones donde se pesó un crisol vacío previamente tarado, al cual se le adiciono aproximadamente 2 g de materia prima posteriormente secada. Se incinero la muestra con un mechero hasta que cesara el desprendimiento de humo, luego la muestra fue llevada a una mufla a 550°C durante 2 h. una vez transcurrido este tiempo, el crisol fue transferido a un horno a 105°C por 15 min. Posteriormente se dejó enfriar en un desecador a temperatura ambiente por 30 min y se pesó (Ramírez, Vélez, Pomeón, & Velásquez, Susana Andrea (Facultad de Quimica, 2008). El porcentaje de cenizas se calculó según

$$\%Cenizas = \frac{C - A}{B - A} * 100$$

Donde:

A: Peso en g de crisol vacío.

B: Peso en g de crisol con la muestra seca.

C: Peso en g de crisol con la muestra calcinada.

2.2.5. Determinación de temperatura de gelatinización.

A 100 mL de agua destilada se le adicionaron 7.5 g de almidón (base seca), esta solución fue calentada en una plancha de calentamiento, a dicha muestra se le introdujo un termómetro y se agito constantemente. El calentamiento se suspendió una vez la solución formara gel, siendo esta la temperatura de gelatinización (Enzimática, Almidón, D, L, & Tipo, 2008).

2.2.6. Determinación del contenido de amilosa y amilopectina.

La determinación del contenido de amilosa y amilopectina se realizó de acuerdo a (Galicia et al., 2012)

2.2.6.1. Preparación de soluciones.

Hidróxido de sodio 1 M, se disolvieron 4 g de hidróxido de sodio en un poco de agua destilada en un balón volumétrico de 100 mL y se aforó.

Hidróxido de sodio 0.1 M, se diluyeron 10 mL de la solución de hidróxido de sodio 1 M, con agua destilada llevándola a mezcla a aforo e un balón de 100 mL.

Solución de Lugol, se adicionan 2 g de yoduro de potasio en 10 mL de agua destilada hasta formar una solución saturada, posteriormente se agregaron 0.2 g de yodo y se disuelve en la mezcla. Luego se afora en un balón de 100 mL con agua destilada.

Estándar de amilosa 1 mg/mL, 100 mg de amilosa se agregaron en un balón aforado de 100 mL, seguido de 1 mL de etanol al 95% y 9 mL de hidróxido de sodio 1 M, dejando reposar la mezcla por 20 h, luego se afora la solución con agua destilada a 100 mL, y se agito vigorosamente.

Se pesó 20 mg de almidón (base seca), al cual se le adiciono 0.2 mL de etanol al 95% procurando que este se deslizara por las paredes del recipiente empleado, luego se adiciono 1.8 mL de hidróxido de sodio 1M, dejando la mezcla en reposo a temperatura ambiente por 20 h aproximadamente, pasado este tiempo se le adiciono 18 mL de agua destilada, agitando vigorosamente.

2.2.6.2. Reacción colorimétrica

De la solución de que contenía el almidón de arracacha se tomó 1 mL de solución, a la que se le adiciono 2 mL de ácido acético 1 M y se agito con fuerza, seguidamente 0,4 mL de la solución de Lugol y 18.4 mL de agua destilada fueron incorporados a la mezcla, dejando la mezcla en reposo por 20 min, evitando el contacto con la luz.

Para la lectura en el espectrofotómetro se tomaron 200 μ L tanto de la solución de la curva estándar como de la muestra de almidón, sin agitar las muestras antes de transferirlas a

la placa. La absorbancia fue leída a 620 nm. Se graficó la lectura de la absorbancia para cada una de las muestras establecidas para la curva con las cantidades conocidas de amilosa, tabla 5, de 0 a 1 mg con un espectro de 270-900 nm y se calculó la pendiente de dicha curva. El porcentaje de amilopectina corresponde al porcentaje restante con respecto al contenido de amilosa.

La curva estándar de amilosa se preparó de acuerdo a la tabla 5.

Tabla 5. Preparación de la curva estándar de amilosa.

MUESTRAS	ESTANDAR DE AMILOSA 1mg/mL (mL)	ÁCIDO ACÉTICO 1 M (mL)	SOLUCION DE LUGOL (mL)	NaOH 0.1 M (mL)	AGUA DESTILADA (mL)
1	0	0.2	0.4	1	18.4
2	0.2	0.04	0.08	0	19.68
3	0.4	0.08	0.16	0	19.36
4	0.6	0.12	0.24	0	19.04
5	0.8	0.16	0.32	0	18.72
6	1	0.2	0.4	0	18.4

2.2.7. Determinación de índice de absorción de agua (IAA), índice de solubilidad en agua (ISA) y poder de hinchamiento (PH).

Para la determinación del IAA e ISA se tomó como base el procedimiento propuesto por (Wang et al., 2010). Se preparó una suspensión de almidón al 2% P/V, la cual se sometió a calentamiento en un baño de agua a 90°C durante 30 min, posteriormente la muestra se centrifugo a 2000 rpm por 20 min, el sobrenadante se retiró y el sedimento se pesó. El sobrenadante retirado se adiciono en un vaso de precipitado previamente tarado, llevándolo al horno a 105°C por 6 h para su secado. El índice de absorción (IAA), el índice de solubilidad (ISA) y el poder de hinchamiento (PH) se calcularon con las siguientes ecuaciones:

$$IAA = \frac{\text{Sedimento (g)}}{\text{Muestra de almidón seco (g)}}$$

$$\%ISA = \frac{\text{Sobrenadantes seco (g)}}{\text{Muestra de almidón seco (g)}} * 100$$

$$PH = \frac{\text{sedimento (g)}}{\text{Muestra de almidón seco (g)} - \text{sobrenadante seco (g)}}$$

2.3. Esquema de procesamiento del material termoplastificado.

En este ítem las biopelículas de almidón termoplastificado se obtienen de la mezcla de almidón derivado de arracacha variedad amarilla, con plastificantes como agua destilada, glicerina y urea, variando la composición y temperaturas, plasmadas en la tabla 6. Se tomaron las cantidades según la combinación y se adicionaron en una caja Petri, con posterior agitación manual hasta obtener una mezcla homogénea; las muestras procesadas a temperatura ambiente ($\approx 18^{\circ}\text{C}$) se dejaron secar por aproximadamente 24 h, mientras que el secado a 60 y 75°C se realizó en una placa de calentamiento, con un tiempo de secado de aproximadamente 10 y 40 min, respectivamente.

Tabla 6. Rotulado de muestras, combinaciones de proporción entre el almidón y los plastificantes con las temperaturas de procesamiento.

Combinaciones	Temperatura de procesamiento			Plastificantes	cantidades	%
	18°C	60°C	75°C			
1	Mx 1	Mx 2	Mx 4	Agua destilada	0.5 mL	5
		Mx 3	Mx 5	Glicerina	2 mL	25
				Almidón	7 g	70
2	Mx 1 Mx 2	Mx 3	Mx 5	Agua destilada	0.5 mL	9
		Mx 4	Mx 6	Urea	1.25 g	24
				Almidón	3.5 g	67
3	Mx 1	Mx 2 Mx 3	Mx 4 Mx 5	Agua destilada	0.5 mL	9
				Glicerina	0.1989 mL	3
				Urea	1 g	20
				Almidón	3.5 g	68
4	--	Mx 1 Mx 2	Mx 3 Mx 4	Agua destilada	2.34 mL	35
				Urea	0.78 g	17
				Almidón	3.5 g	48
5	--	Mx 1 Mx 2	Mx 3 Mx 4	Agua destilada	3.12 mL	42
				Urea	0.78 g	10
				Almidón	3.5 g	48

Mx: Muestra

Fuente: Autor.

2.4. Análisis infrarrojo

El análisis del espectro infrarrojo se realizó en un espectrofotómetro shimadzu Prestige XXI, donde se caracterizaron los espectros del almidón termo plastificado de acuerdo al plastificante, cantidad empleada de este. Los espectros se registraron entre los 4000 a 500 cm^{-1} .

2.5. Ensayos de tracción

Los ensayos de tracción se desarrollaron de acuerdo a la norma ASTM D882 (American Society for Testing and Materials. ASTM., 2002; M. I. J. Ibrahim, Sapuan, Zainudin, & Zuhri, 2019), para películas de menos de 1 mm de espesor, con medidas aproximadas a 10x100 mm, ancho x largo, respectivamente; acondicionadas con anterioridad a una humedad relativa de 55% con presencia de dicromato de sodio, que fueron evaluadas en un equipo MTS systems corporation a una velocidad deformación de 2 mm/min, con una separación de empuñadura de 31 mm.

2.6. Biodegradabilidad

Se evaluó la biodegradabilidad en campo, mediante la exposición de las biopelículas obtenidas las condiciones medio ambientales de la ciudad de Pamplona durante 7 días, en una maseta que contenía plantas ornamentales, de los cuales se registró fotográficamente trascurrido cada día el aspecto físico tanto del material como el de la planta.

2.7. Aplicación industrial

Los posibles usos que pueden tener las biopelículas obtenidas se determinaron mediante el uso del software CES-EDUPACK, que es una base de datos educativo de materiales ya sean cerámicos, plásticos o metálicos, en el cual se introducen los valores de las

propiedades de las biopelículas para establecer similitudes otros materiales y poder establecer las posibles aplicaciones.

CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y ANÁLISIS

3. Resultados y análisis

3.1. Rendimiento del almidón

El rendimiento es el porcentaje y/o fracción obtenida de almidón una vez finalizado el proceso de extracción a partir del tubérculo (arracacha variedad amarilla). La tabla 7, muestra los valores procesados de la raíz de arracacha con un total de 5 muestras a las cuales se les extrajo el almidón; las muestras 1, 4 y 5 fueron procesadas con agua en una relación de 1:3 sólido: líquido, mientras que las muestras 2 y 3, se les extrajo el almidón en una proporción con agua de 1:10, evidenciando que el rendimiento de extracción de las muestras 2 y 3 disminuye considerablemente con el aumento de la cantidad de agua destilada adicionada a la mezcla, de acuerdo a esto el almidón que se empleó en la caracterización fisicoquímica y obtención de las biopelículas fue el extraído en una 1:3 arracacha: agua destilada, en cuantos a los rendimientos en la extracción de las muestras 1, 4 y 5 se encuentran dentro de los rangos establecidos en la literatura según la tabla 2, sin embargo, se encuentran en el límite más bajo del rango, adicional a esto (Alayo Sánchez, 2015), resalta que, específicamente para la variedad amarilla de arracacha el rendimiento es de 11.1%, y que diversos factores ambientales, variedad, suelo, altura, tiempo de cosecha y método de lo extracción son determinantes en el rendimiento, mientras que (Liendo & Perdomo, 2011) describe un rendimiento de 6.12 ± 0.59 , resultado ligado al método de extracción en el cual la relación materia prima-agua excede la relación de 1:3 lo que reduce significativamente la cantidad de almidón obtenido, ahora bien, el promedio en el rendimiento de las muestras 1, 4 y 5 es de $12.18 \pm 2.58\%$, fue un poco mayor al de la literatura para esta variedad de arracacha pero aun así se encuentra en el rango antes registrado.

Tabla 7. Muestras procesadas de Arracacha con su determinado rendimiento del proceso de extracción de almidón.

MUESTRAS	ARRACACHA PROCESADA (g)	ALMIDÓN SECO (g)	%RENDIMIENTO DE EXTRACCIÓN
1	370.0685	38.6526	10.4447
2	128.8426	7.6314	5.9230
3	133.2006	6.1871	4.6449
4	787.0034	86.1691	10.9490
5	1043.0725	157.9878	15.1464

Fuente: Autor.

3.2. Apariencia microscópica

En las figuras 9 y 10, se observan las microfotografías de los granulos de almidón, donde en el objetivo de 10x no se logra visualizar con claridad la forma ni el tamaño de los granulos, mientras que en el objetivo de 40x es aparente la forma poliedrica y redondeada con un tamaño de gránulo promedio de 7.75 μm ; siendo 25 μm el tamaño de gránulo mayor y 1 μm el de menor tamaño. (Salas cuestas, 2018), reporta que la variedad de arracacha amarilla muestra granulos con tamaños entre 2 – 33 μm y 7 a 25 μm , mencionando que los granulos de almidon entre mas pequeños presentan un mayor poder de hinchamiento, mayor capacidad de retencion de agua y menor susceptibilidad a la alfa amilasa, enzima que se encarga de la catalización del proceso de hidrolisis del almidón. El tamaño y forma de los almidones son caracteristicos para cada tipo de tuberculo e inclusive la variedad.

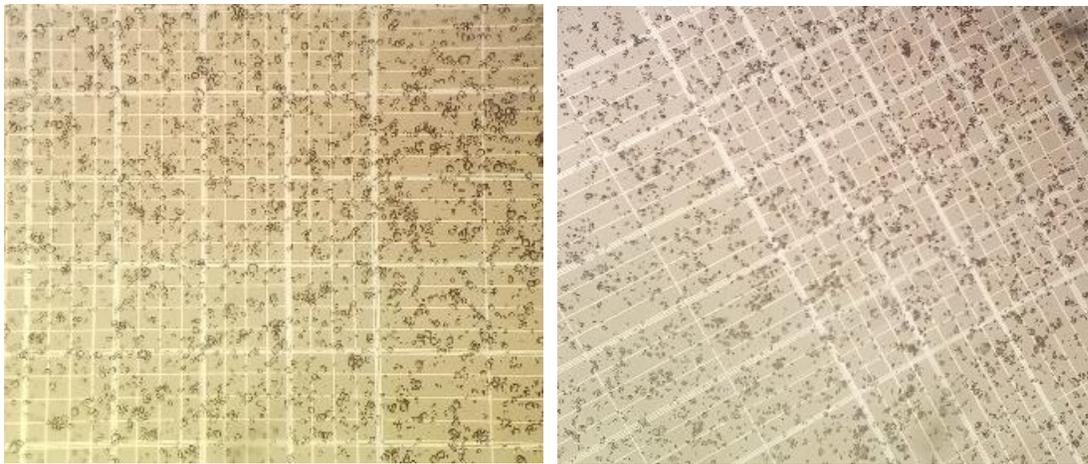


Figura 10. Microfotografías de granulos de almidón con objetivo de 10X.

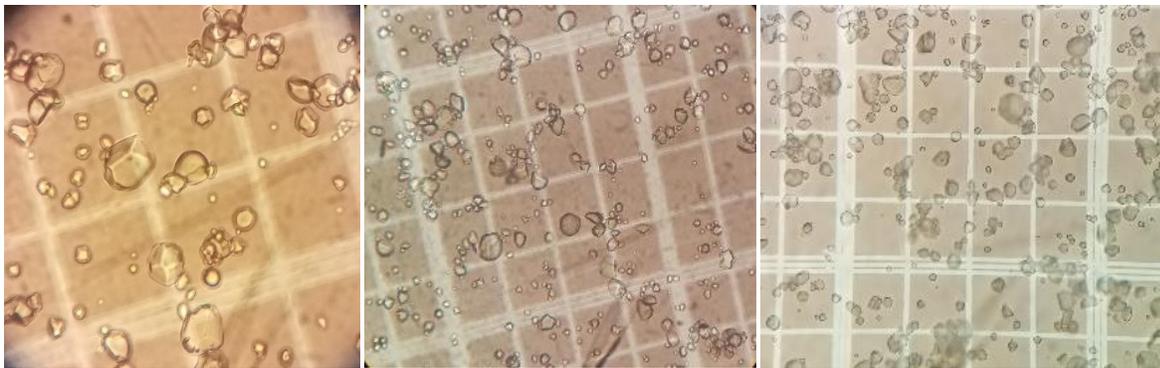


Figura 9. Microfotografías de granulos de almidón con objetivo de 40X

3.3. Caracterización fisicoquímica

En la tabla 9 se consignaron los resultados de la caracterización fisicoquímica que fue realizada al almidón obtenido con un valor de 4.8 ± 0.06 para el pH, de acuerdo a los datos reportados por (Acosta & Blanco, 2013; Leonel & Cereda, 2002; Liendo & Perdomo, 2011; Salas cuestas, 2018) el pH del almidón de arracacha se encuentra en un rango 5.3-6.4 encontrándose el valor experimental obtenido por fuera del límite esperado; este resultado está sujeto a diversos factores tales como condiciones del tubérculo, nivel de maduración, variedad de la raíz y otra variable añadida en este trabajo para mejorar las condiciones del proceso es la adición de una solución de ácido cítrico para reducir el pardeamiento enzimático, donde las moléculas del ácido se anclan a los gránulos del almidón aportando algún grado de acidez. En cuanto al porcentaje de humedad cabe aclarar que se obtuvieron dos tipos reportados en el tabla 8, aunque proceden del mismo tubérculo y el mismo proceso de obtención, en el secado una muestra estuvo en contacto directo con el fondo del horno mientras que la otra no, aunque el horno se mantuvo a una temperatura estable de 40°C por 20 h, esto produjo que la muestra A mostrara una humedad de 37.71 ± 0.19 ; mientras que la muestra B se le determino una humedad de 12.21 ± 0.75 , donde este último valor está en mayor concordancia con los reportados para la variedad de arracacha amarilla en la tabla 3.

Tabla 8. Valores para la determinación de la humedad del almidón procesado.

MUESTRAS	% HUMEDAD
1	37.6662
2	37.9377
3	37.5486
4	12.2818
5	11.4276
6	12.9323

Fuente: Autor.

Tabla 9. Caracterización fisicoquímica del almidón de arracacha.

PARAMETROS	VALOR	UNIDADES
TAMAÑO DE GRANULO	7.75	µm
pH	4.8 ± 0.06	--
HUMEDAD	37.71 ± 0.19	%
CENIZAS	0.12 ± 0.00	%
TEMPERATURA DE GELATINIZACIÓN	63.16 ± 0.76	°C
AMILOSA	26.15 ± 0.22	%
AMILOPECTINA	73.84 ± 0.22	%
INDICE DE ABSORCIÓN DE AGUA	11.88 ± 0.34	g gel/ g muestra
INDICE DE SOLUBILIDAD EN AGUA	1.75 ± 0.82	%
PODER DE HINCHAMIENTO	12.09 ± 0.36	g agua/g almidón

Fuente: Autor.

Por otro lado, en el porcentaje de cenizas no hubo una diferencia significativa con respecto a los estudios antes realizados a este tubérculo (Pedro & Mostacero, 2001; F. Perez, 2017), el porcentaje de 0.12 ± 0.00 es un poco más bajo que el reportado, sin embargo, en otros estudios relacionados el porcentaje de cenizas es mayor (Acosta & Blanco, 2013). La temperatura de gelatinización de arracacha empleada fue de $63,16 \pm 0,76^\circ\text{C}$; valor que se encuentra dentro de los rangos mostrados por (Liendo & Perdomo, 2011; Pedro & Mostacero, 2001; Salas cuestas, 2018) para almidón de arracacha que van desde $54-65.8^\circ\text{C}$, siendo este el de menor rango de temperatura de gelatinización entre los diferentes almidones que se pueden extraer de tubérculos andinos, que representa la inestabilidad de los enlaces inter e intramolecular de esta variedad, puesto que el aporte de energía que necesitan para iniciar el proceso de gelatinización es bajo (Liendo & Perdomo, 2011), lo que representa una ventaja, ya que, puede ser usado en la industria de alimentos, en procesos en los que sea necesario proporcionar viscosidad a ciertos tipos de mezclas como cremas, sopas, salsas entre otras en las que se involucran bajas temperaturas. Durante el proceso de gelatinización el estado granular desaparece, debido a que, los gránulos forman una masa amorfa y en conjunto con el rompimiento de los enlaces de hidrogeno y adición de los grupos hidroxilos del agua forman un gel. La gelatinización produce cambios relevantes en las propiedades reológicas del almidón, que tienen incidencia directa en la funcionalidad e incorporación del almidón en diversas aplicaciones y marcan las características del producto que se obtenga a partir de este (Acosta & Blanco, 2013).

El contenido de amilosa y amilopectina fue de 26.15 ± 0.22 y 73.84 ± 0.22 , respectivamente, valores que se encuentran dentro de los reportados en la literatura, siendo resultados aceptables teniendo en cuenta que para obtener TPS con buenas propiedades, el contenido de amilosa no debe ser tan alto, ya que un alto contenido de amilosa disminuye la flexibilidad de los TPS, en comparación de los almidones con altos composición de amilopectina por su estructura ramificada, además almidones con alto contenido de amilosa afecta el esfuerzo que hace que aumente y disminuye la elongación del material (Villada, Acosta, & Velasco, 2008). La relación de amilosa/amilopectina en los almidones cambia según el tiempo de cosecha, tipo de suelo, altura, origen botánico, proceso de obtención variedad de especie y condiciones de almacenamiento (Quinto, Solano, & Silva, 2015).

La capacidad de absorción de agua está asociada al tamaño de los gránulos, las fuerzas de enlace intragranulares y la presencia de lípidos que forman complejos insolubles con la amilosa (Liendo & Perdomo, 2011). El índice de absorción de agua del almidón de arracacha evaluado presento un promedio de 11.87 ± 0.34 , de acuerdo a los resultados reportados por (Alayo Sánchez, 2015) el índice absorción de la arracacha variedad amarilla es de 16.03 ± 0.35 , un valor que se encuentra por encima del reportado en este documento, sin embargo, (Salas cuestas, 2018) documenta un rango de 0.82 a 16.83 g gel/ g muestra para los diferentes tipos de almidones, en los que se ajusta el valor obtenido.

Por su parte, los valores del índice de solubilidad y poder de hinchamiento de acuerdo a la tabla 9, fue de 1.75 ± 0.82 y 12.09 ± 0.36 , respectivamente. El índice de solubilidad fue bajo si se compara con los valores descritos por (Alayo Sánchez, 2015), para la arracacha amarilla. (Alayo Sánchez, 2015) reporta un porcentaje de índice de solubilidad y poder de hinchamiento g agua/g almidón de 15.36 ± 0.87 y 16.23 ± 0.2 , respectivamente. El poder de hinchamiento está relacionado con el contenido de amilosa en el almidón, puesto que a menor contenido de amilosa el poder de hinchamiento es mayor (Herrera, 2003). (Salas cuestas, 2018) muestras que los rangos de ISA y PH, conforme reportan diferentes autores van de 0.27 a 15.36% y 0.79 a 16.42 g agua/g almidón, en los cuales los valores obtenidos se asemejan a los consultados en literatura, además (Salas cuestas, 2018) demuestra que los IAA, ISA y PH, presentan variación según el mes de crecimiento de la planta de arracacha, donde la absorción de agua y la consecuente hinchazón de los gránulos son

los causantes de la disociación de fases de amilosa-amilopectina y la pérdida de cristalinidad, causando lixiviación de la amilosa al espacio intergranular.

Según (Aristizábal & Sánchez, 2007) los almidones con alta absorción de agua, baja solubilidad y un alto poder de hinchamiento, son de buena calidad con gran contenido de almidón.

3.4. Biopelículas

Las figuras 11 a 14 corresponden a las muestras que no se sometieron a un aumento de temperatura en su secado, es decir, fueron procesadas a temperatura ambiente que fue de aproximadamente 18°C, con las combinaciones 1, 2 y 3 de la tabla 6. Las muestras Mx1 de las combinaciones 1 y 3 que contenían glicerina presentaron un aspecto gelatinizo, que no logro plastificar una vez trascurrido el tiempo de secado, impidiendo su desprendimiento de la caja Petri, por otro lado, las muestras Mx1 y Mx2 de la combinación 2 que contenían urea, al retirarlas de las cajas tuvieron un comportamiento elástico pero muy frágil al tacto.

Se decidió no evaluar otras combinaciones en la composición del almidón termo-plastificado a temperatura ambiente, pues dichas muestras no demostraron plastificación.

Muestras procesadas a temperatura ambiente ($\approx 18^\circ\text{C}$)

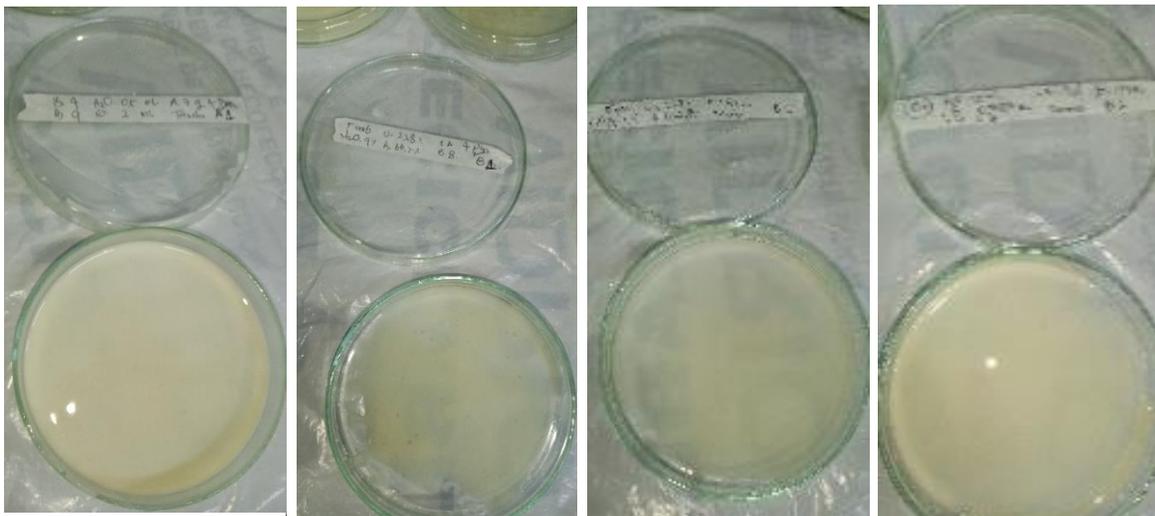


Figura 14.
Combinación 1 Mx 1

Figura 13.
Combinación 2 Mx 1

Figura 12.
Combinación 2 Mx 2

Figura 11.
Combinación 3 Mx 1

Las biopelículas plastificadas a 60°C se observan en las figuras 15 a 23 con las combinaciones 1, 2, 3, 4 y 5, para desprender las muestras de la caja se debe esperar a que las biopelículas reduzcan su temperatura, pues al estar a 60°C se tornan frágiles por la expansión que sufren las cadenas poliméricas. Las muestras Mx2 y Mx3 de la comb. 1 fueron las únicas que no plastificaron, formando una pasta de difícil desprendimiento con aspecto arenoso, caso contrario a los demás prototipos. Las biopelículas Mx3 y Mx4 de la comb. 2, con las Mx2 y Mx3 de la comb. 3, aunque mostraban alta flexibilidad y de sencilla separación tendían a fragmentarse con facilidad, por su parte, las muestras Mx1 y Mx2, de las comb. 4 y 5 mostraron un aspecto pegajoso al contacto con cualquier superficie con buena elasticidad de fácil retiro de la caja Petri.

Muestras procesadas a 60°C

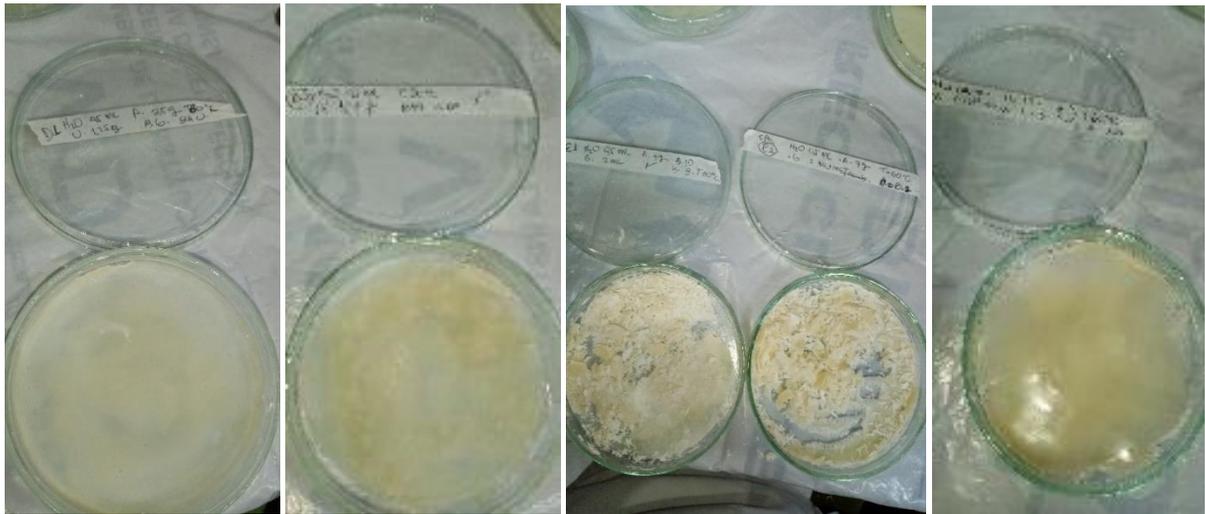


Figura 20. Combinación 2 Mx3 Figura 20. Combinación 2 Mx4 Figura 21. Combinación 1 Izquierda Mx2; Derecha Mx3 Figura 20. Combinación 3 Mx2



Figura 16. Combinación 3 Mx3

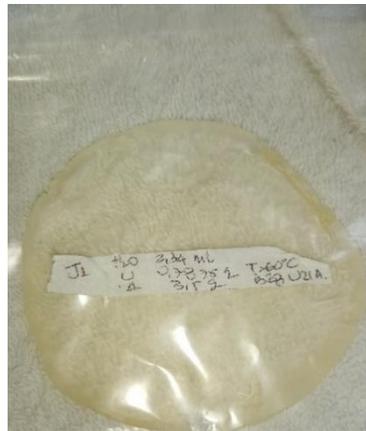


Figura 16. Combinación 4 Mx1

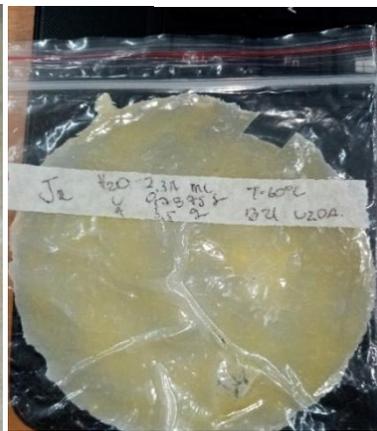


Figura 17. Combinación 4 Mx2

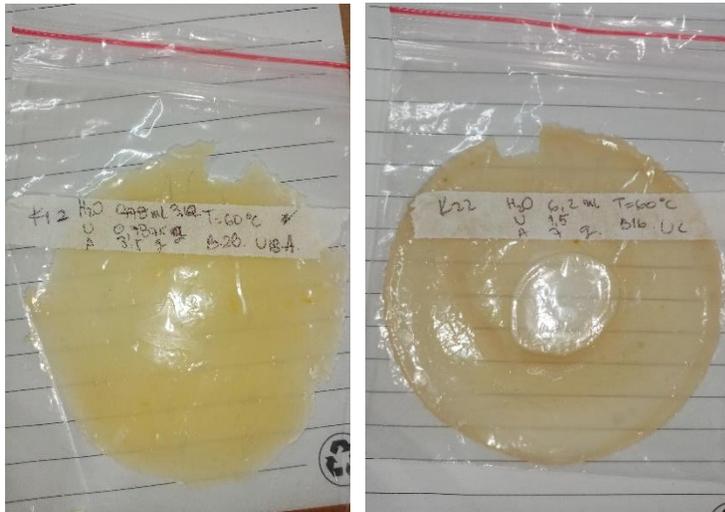


Figura 22. Combinación 5 Mx1

Figura 23. Combinación 5 Mx2

Continuando con la descripción de las muestras procesadas a 75°C, temperatura que supera el promedio de gelatinización del almidón aquí extraído, se obtuvieron las combinaciones mostradas en las figuras 24 a 33 de las cuales las biopelículas Mx4 y Mx5, de la comb. 1, de manera similar a Mx2 y Mx3 de la misma combinación, no presentaron plastificación, con aspecto parecido al descrito anteriormente a estas biopelículas, siendo un signo de que la glicerina no es un buen plastificante. En contraste las demás muestras si presentaron una aparente plastificación, sin embargo, Mx5 y Mx6 de la comb. 2, aunque se separan fácil de la caja petri muestran zonas fracturadas que restringen la aplicación de algún tipo de prueba mecánica. Las especímenes Mx4 y Mx5 de la comb. 3, exhibieron buena flexibilidad, con desprendimiento docil de la caja que las contenía pero al ser sometidas algún tipo de fuerzas se segmenta rápidamente.

En Mx3 y Mx4 de la comb. 4, se notaron físicamente buenas propiedades en cuanto a flexibilidad, elasticidad, tonalidad, no obstante se torna de difícil manipulación por su tendencia a adherirse a las superficies, mientras que las biopelículas Mx3 y Mx4 de la comb. 5, aunque tienen las mismas propiedades como flexibilidad y elasticidad, su tonalidad es más oscura y tiende a fijarse a las superficies con las que tiene contacto.

Muestras procesadas a 75°C

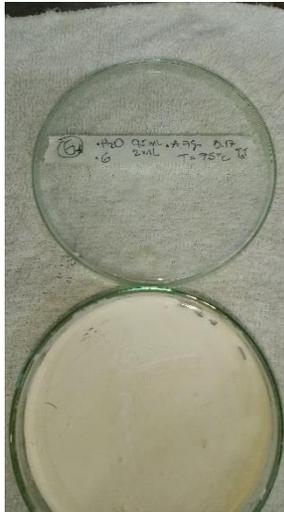


Figura 30.
Combinación 1 Mx4

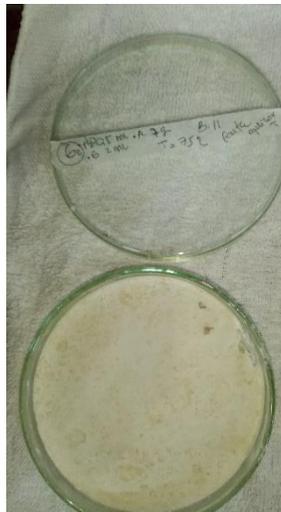


Figura 30.
Combinación 1 Mx5



Figura 30.
Combinación 2 Mx5



Figura 27.
Combinación 2 Mx6

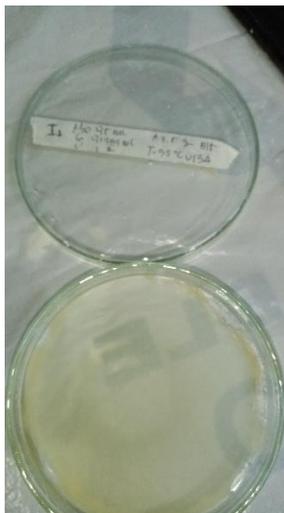


Figura 26.
Combinación 3 Mx4

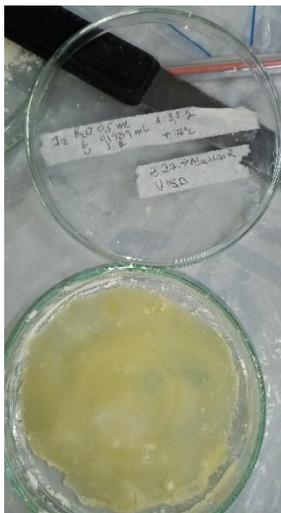


Figura 26.
Combinación 3 Mx5

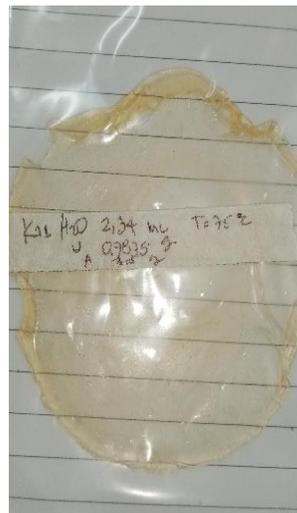


Figura 31.
Combinación 4 Mx3

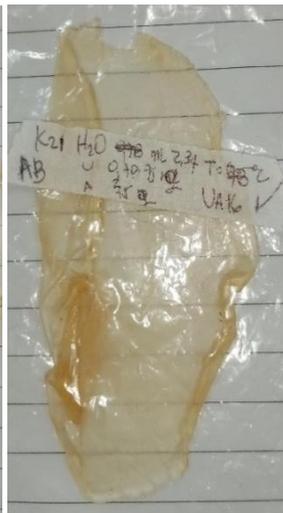


Figura 26.
Combinación 4 Mx4

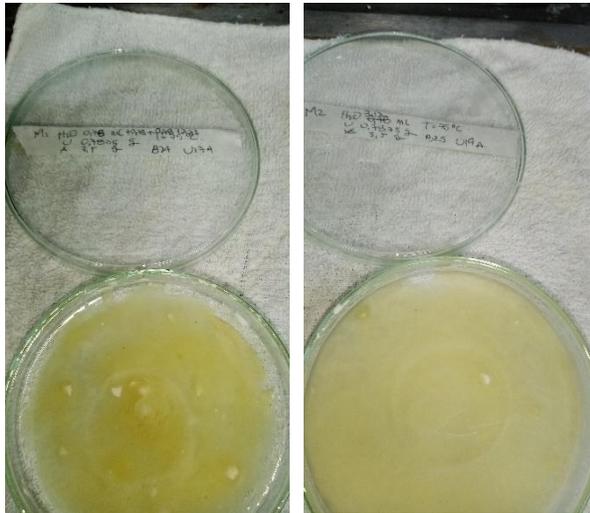


Figura 33.
Combinación 5 Mx3

Figura 32.
Combinación 5 Mx4

Las combinaciones en las que se aplicaron agua destilada y glicerina o glicerol como plastificante no desarrollaron la plastificación esperada, como se describen según (Carrera, 2009; Enriquez, Velasco, & Ortiz, 2012; Oropeza, Montes, & Padron, 2016; T. Sanchez, Garcia, & Pinzon, 2012) entre muchos otros autores, que reportan buenos resultados en las biopelículas que desarrollaron, empleando almidón y glicerina, sin embargo, (Berenice, Carballo, & Ciencias, 2017), precisa un rango de 1-25% de contenido de plastificante en el TPS, ya que el contenido de plastificante es un factor crítico en la retrogradación del almidón, cuando este porcentaje excede los 25% interfiere en esta retrogradación. Es así como las combinaciones empleadas fueron del 25% de glicerol y 5% de agua proporciones que se encuentran por encima de este rango, siendo el motivo por el cual no se lograra la plastificación reportadas por diversos autores del almidón con adición de glicerol; cabe recalcar que, con cantidades inferiores a las empleadas (tabla 6), no fue posible homogenizar la mezcla, por cual se hizo necesario aumentar el contenido de plastificante.

Entre menor sea la cantidad de agua empleada en conjunto con la urea, más difícil es la separación de la biopelícula de la caja Petri, también una gran cantidad de agua hace que la muestra se torne pegajosa y de difícil manejo puesto que se adhiere a la superficie con facilidad.

3.5. Análisis infrarrojo

El análisis infrarrojo muestra los grupos funcionales presentes en compuestos orgánicos, en la cual se interpreta el espectro comparándolo con base de datos ya determinadas, y así establecer la existencia de algunos grupos funcionales en la estructura molecular del compuesto evaluado (Quiroga, 2011).

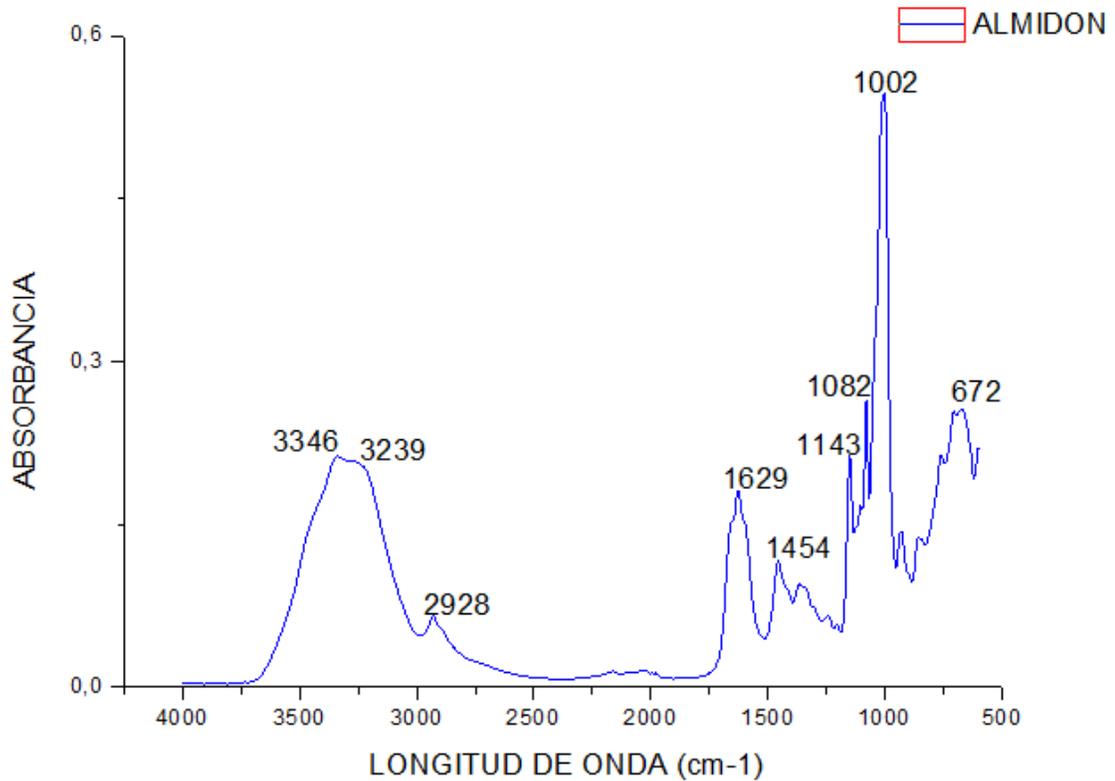


Figura 34. Espectro infrarrojo del almidón extraído de arracacha.

En la figura 34 se observan las bandas características del espectro IF del almidón, en el cual es similar para este de compuesto en la arracacha (Pardo Cuervo & Velasco Mosquera, 2012), mostrando un pico característico en 3346 cm^{-1} ancho lo cual muestra un estiramiento del enlace O-H, en un estado polimérico con una posición que va de $3400 \sim 3200 \text{ cm}^{-1}$, este se debe a la presencia de la molécula de amilosa en el almidón. También se ve la señal de estiramiento de H-O-H a 3239 cm^{-1} que se da en muestra que

se encuentran húmedas ($3600\text{-}3100\text{ cm}^{-1}$) que en tal caso se muestra también un pico entre $1640\text{-}1615\text{ cm}^{-1}$ que como se observa en la figura se encuentra en 1629 cm^{-1} , lo que respalda el alto contenido de humedad que hallado en el almidón empleado para obtener las biopelículas (tabla 8 y 9). La flexión en 2928 cm^{-1} corresponde al enlace C-H, característico de los polisacáridos, encontrándose la amilosa y la amilopectina dentro de este grupo. Los picos 1143 y 1082 corresponden a grupo de esteres con enlaces C=O y C-O, presentes en los enlaces glicosídicos. El pico agudo en 1002 es una señal complementaria de los estiramientos de C-O (Rojo Callejas, 2000; Salcedo Mendoza, Figueroa Flórez, & Hernandez Ramos, 2017).

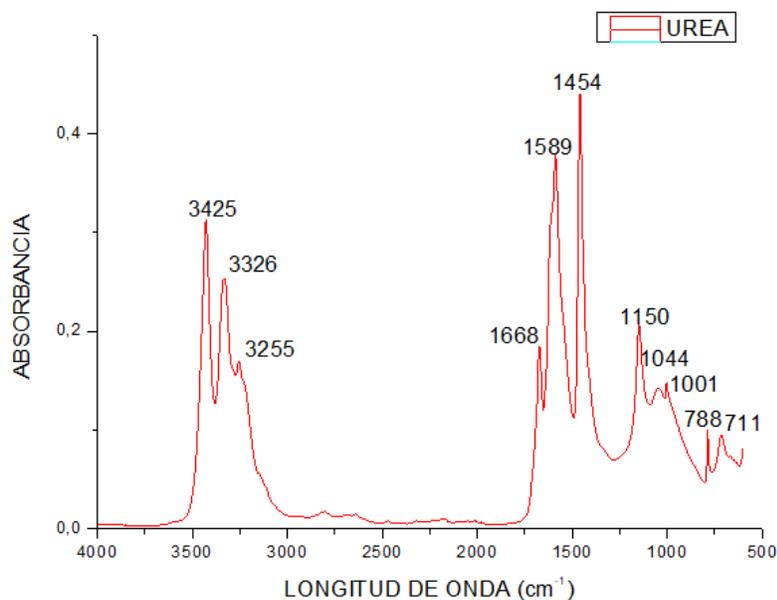


Figura 35. Espectro IF de urea.

El espectro IF de la urea empleada como plastificante se puede observar en la figura 35 con pico marcados en 3425, 3326, 3255, 1668, 1589, 1454, 1150, 1044, 1001, 788 y 711 cm^{-1} , las vibraciones de 3425 y 3326 representan la tensión del enlace -NH_2 , que aparece como dos bandas agudas con intensidad variable entre el intervalo $3500\text{-}3300\text{ cm}^{-1}$ siendo una amida primaria, mientras que los 3255 representa la forma asociada pues esta se ubica como una banda un poco más ancha junto a la forma libre de la amida. Estas bandas pueden confundirse con el estiramiento característico del enlace C-OH. La señal de 1668 muestra la presencia de un doble enlace, 1589 y 1454, puede representar la presencia. Las flexiones en el plano ($1225\text{-}950\text{ cm}^{-1}$) son complementarias de los estiramientos C-N

y C-O presentes en la molécula en las cuales se presentan varias señales de acuerdo al número de hidrógenos, se muestran como señales débiles pero agudas. El pico 1668 cm^{-1} se presenta como un alargamiento de C=O que se manifiesta entre $1900\text{--}1650\text{ cm}^{-1}$, la flexión en 1454 cm^{-1} se da por una deformación de los enlaces C-H; las fluctuaciones que se encuentran entre $1000\text{--}650\text{ cm}^{-1}$ son posibles deformaciones fuera del plano, los picos ($1710\text{--}1630$) y ($3500\text{--}3200$) son representativos de la estructura de las amidas (Mendoza & Amezcua, 2009; Rojo Callejas, 2000).

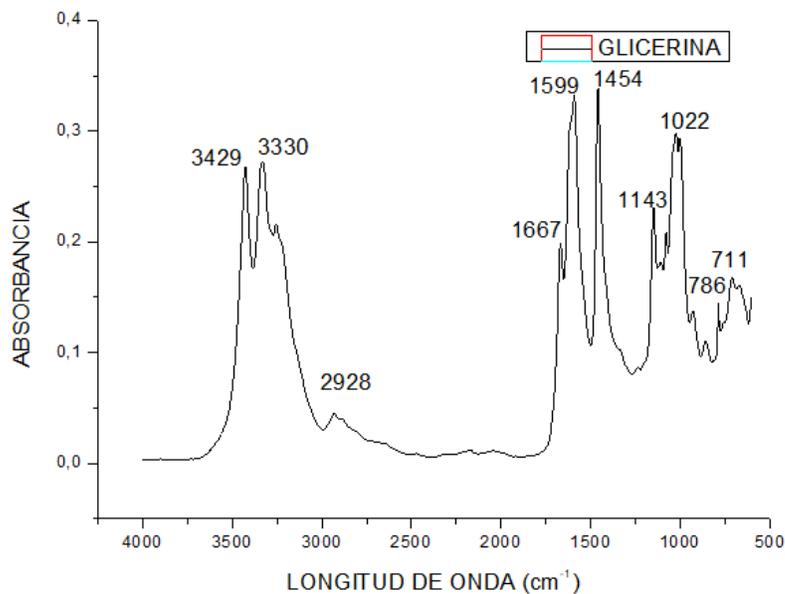


Figura 36. Espectro IR de glicerina.

El espectro de glicerina muestra dos picos asociados al rango $3450\text{--}3300\text{ cm}^{-1}$ que están ligados al grupo de alcohol con absorción de hidrógeno del enlace de O-H, el pico de 2928 cm^{-1} representa la tensión de C-H que va se reflejada de $3000\text{--}2800\text{ cm}^{-1}$, las vibraciones 1143 y 1022 cm^{-1} muestra las oscilaciones de los enlaces CH-OH. Los picos 1667 y 1599 cm^{-1} marcan los enlaces alifáticos C-C, correspondiente a la estructura molecular de la glicerina o glicerol. Por su parte, el punto 1454 se deriva por la deformación del enlace C-H que se muestra en el rango de $1475\text{--}1300\text{ cm}^{-1}$ (Mendoza & Amezcua, 2009; Ramírez-corona, 2017; Rojo Callejas, 2000).

Los espectros obtenidos de las biopelículas que pudieron ser evaluadas se pueden observar en las figuras 37-40, los espectros arrojados son una combinación de los espectros mostrados por las materias primas empleadas, ya sea, el almidón, el glicerol y la urea, diferenciándose solo en la intensidad de la señal. Un aumento en la longitud de onda de los picos corresponde a una mayor movilidad de las moléculas en las muestras, lo que se asocia a un aumento de flexibilidad de la biopelícula por la influencia de los plastificantes en la mezcla (Almario, Durango, & Arizal, 2018).

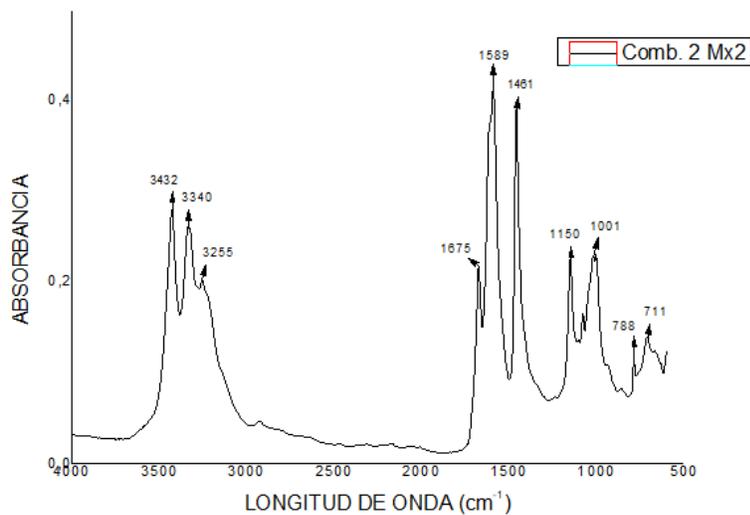


Figura 37. Espectro infrarrojo de la biopelícula Mx2 de la combinación 2.

El espectro IF de la biopelícula Mx2 de la comb. 2, (figura B2), muestra ciertos picos representativos entre la urea y el almidón, en los cuales la fluctuación en 3340, 1001 se relacionan al espectro del almidón con un enlace O-H y un estiramiento de la cadena C-O. Mientras que los demás picos se asemejan a los mostrados por la urea, lo que pudiese otorgarle características o propiedades similares a la urea.

Por otro lado, la figura 38 y 40 muestran los espectros de las biopelículas procesadas a 60°C y 75°C, respectivamente, en las que se empleó agua destilada y urea como plastificantes; de manera similar a los espectros de almidón y urea los picos varían en relación a las diferentes concentraciones de plastificantes que se emplearon en estas muestras. Las bandas mostradas cerca de los $\sim 3500\text{ cm}^{-1}$, representa la vibración de los grupos -OH anteriormente mencionado, pero en el caso de las biopelículas muestra la

formación de nuevos enlaces (puentes de hidrogeno), lo que las hace un material altamente higroscópico (Palma-rodríguez, Salgado-delgado, & Páramo-calderón, 2017).

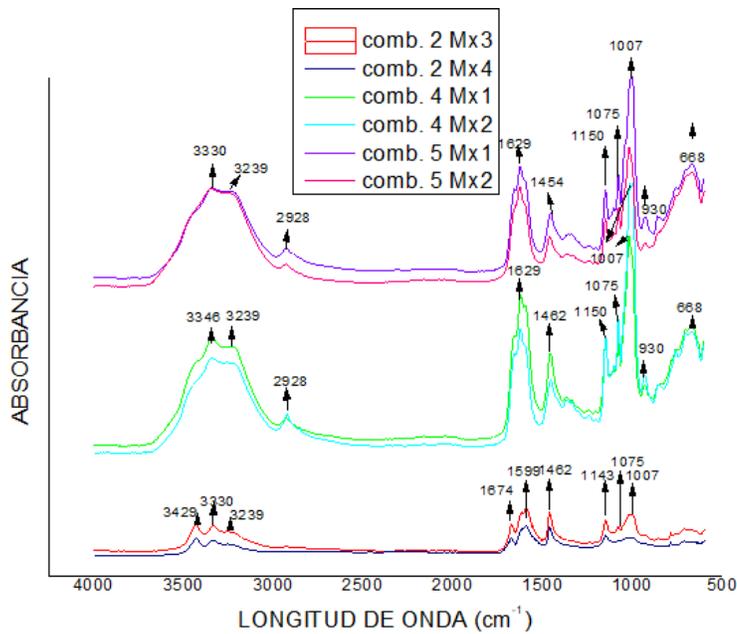


Figura 38. Espectro infrarrojo de las biopelículas procesadas a 60°C, de las combinaciones 2, 4 y 5.

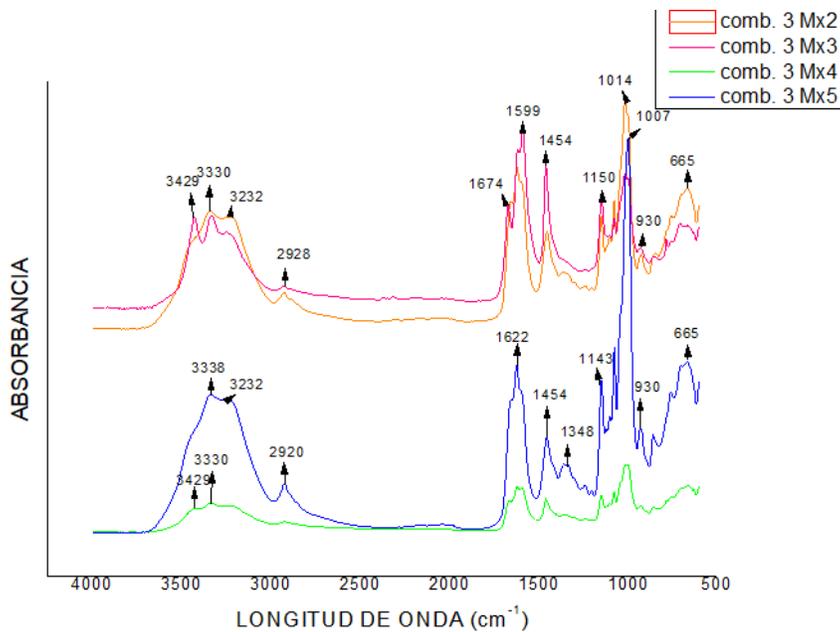


Figura 39. Espectro infrarrojo de las biopelículas procesadas a 75°C, de la combinación 3.

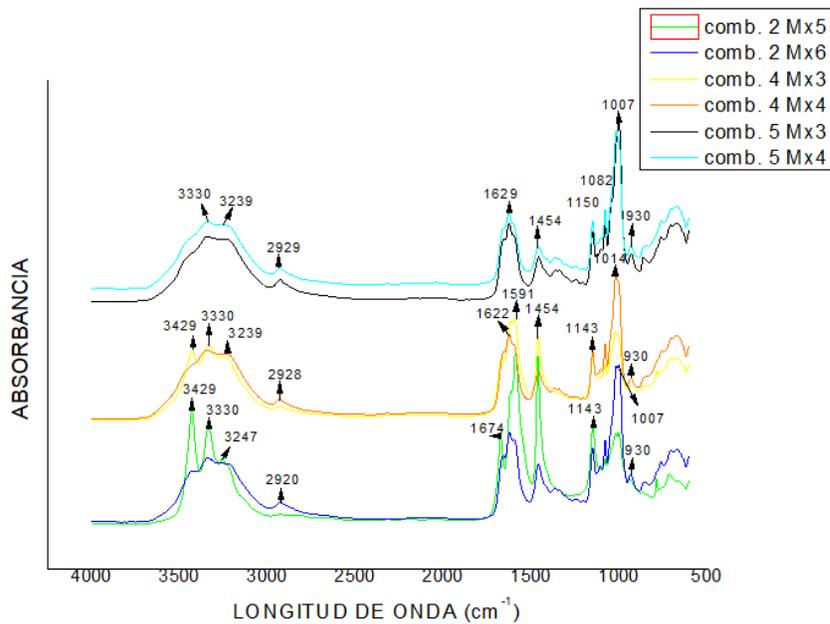


Figura 40. Espectro infrarrojo de las biopelículas procesadas a 75°C, de las combinaciones 2, 4 y 5.

Las longitudes de onda alrededor de $\sim 1620 \text{ cm}^{-1}$ son vibraciones de deformación del enlace N-H pues aparece como banda intensa. Mientras que las vibraciones en 930 cm^{-1} corresponde al grupo C-O, los 850 cm^{-1} se da por la flexión del enlace O-O, y las bandas alrededor de $\sim 1000 \text{ cm}^{-1}$ está ligada en las biopelículas con estructuras amorfas; los grupos -OH presentes en todas las muestras presentan una alta concentración que hace que su banda características se ensanche y se mueva a los $3200\sim 3400 \text{ cm}^{-1}$ (Mendoza & Amezcua, 2009; Palma-rodríguez et al., 2017), presentes en las figuras 38, 39 y 40.

3.6. Ensayos de tracción

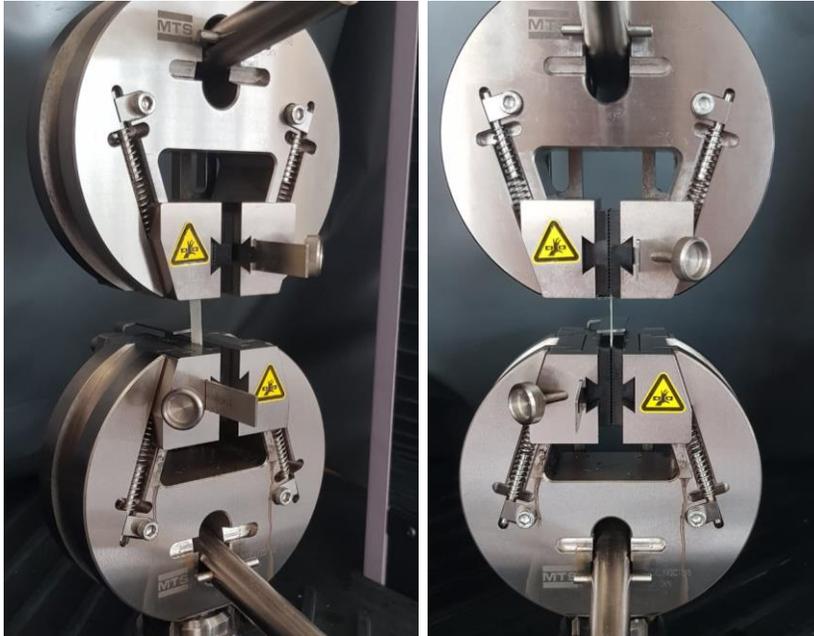


Figura 41. Equipo empleado en las pruebas de tracción.

Las muestras que fueron sometidas a los ensayos de tracción como se observa en la figura 41, para evaluar sus propiedades mecánicas fueron: Mx3 de la comb. 2, Mx2 y Mx4 de la comb. 3, Mx1 y Mx4 de la comb. 4 y por último, de la comb. 5 la Mx4, las demás biopelículas no fueron analizadas puesto que, las muestras presentaban mucha fragilidad, además la reproducción del ensayo se vio limitado por este factor, en algunas combinaciones tales como 3 y 4, la muestra Mx4 solo se llevó a cabo un análisis, tabla 10. En todos los ensayos el análisis se desarrolló hasta que se detectó una rotura en el material.

Tabla 10. Numeración de los ensayos de tracción realizado a cada biopelícula.

COMBINACIÓN	2		3			4			5			
BIOPELÍCULA	Mx 3		Mx 2	Mx 4	Mx 1	Mx 2			Mx 4			
ENSAYO	5	6	10	11	7	8	9	1	2	3	4	

Fuente: Autor.

En la figura 42 se puede observar el comportamiento mecánico de cada una de las muestras evaluadas del TPS; su respectiva gráfica de esfuerzo en función de la deformación del material, permite determinar que las muestras de los ensayos 1, 2, 3 y 4,

son las que tienen una mayor resistencia a la tensión, con pendientes más pronunciadas que los demás ensayos, lo que le otorga un mayor módulo de elasticidad, cuyos valores están consignados en la tabla 11, para cada biopelícula.

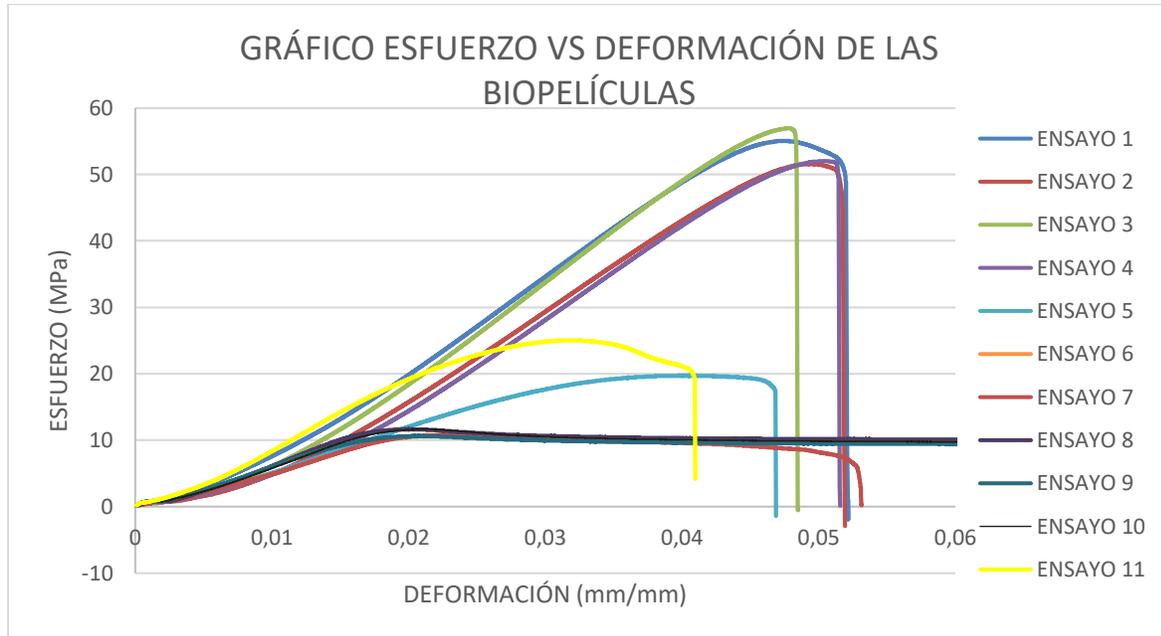


Figura 42. Gráfica esfuerzo vs deformación de los ensayos de tracción de las biopelículas analizadas. Fuente: Autor

El espesor de las biopelículas tiene una particular incidencia en la resistencia a la tensión de las biopelículas entre más delgadas sean, estas tienden a fallar con mayor facilidad, adicional a esto, las biopelículas sometidas al secado a 75°C, por encima de la temperatura de gelatinización del almidón, desarrollan una menor elongación y módulo de elasticidad que las muestras procesadas a 60°C, lo que determina que la temperatura de procesamiento es un factor importante en la obtención de TPS, por otro lado, si se comparan los valores del módulo de elasticidad y elongación de las biopelículas Mx3 y Mx2, de las comb. 2 y 3, respectivamente, de la tabla 11, se observa que para Mx2 estos valores aumentan, aunque estas muestras contengan igual porcentaje de agua destilada, y cercanos valores para los porcentajes de la urea y el almidón, esto se debe a la adición del 3% de glicerina a la mezcla de Mx2 de la comb. 3, que debido a su acción lubricante relaja los enlaces del almidón lo que permite alargar las cadenas poliméricas, dando mayor

flexibilidad. El glicerol al ser soluble en agua se muestra como un agente suavizante mejorando la flexibilidad del material resultante (Enriquez et al., 2012).

Tabla 11. Principales propiedades mecánicas de las biopelículas a partir de almidón de arracacha termoplastificado seleccionadas.

COMBINACIÓN	BIOPELÍCULA	ESPESOR (mm)	MÓDULO DE ELASTICIDAD (MPa)	RESISTENCIA A LA TENSIÓN (MPa)	ELONGACIÓN (%)
2	Mx 3	0.45	685.33 ±38.04	19.65 ±0.09	3.76 ±0.11
3	Mx 2	0.75	975.20 ±289.22	18.35 ±9.46	12.55 ±13.62
3	Mx 4	0.5	671.61 ±0.00	10.78 ±0.00	2.24 ±0.00
4	Mx 1	0.5	785.89 ±60.92	11.14 ±0.73	12.83 ±9.25
5	Mx 2	0.8	1493.23 ±87.72	54.52 ±2.73	4.00 ±0.07
5	Mx 4	0.8	1442.28 ±0.00	52.01 ±0.00	3.99 ±00

Fuente: Autor

Tabla 12. Propiedades mecánicas de diversos materiales.

MATERIAL	MODULO DE ELASTICIDAD (MPa)	RESISTENCIA A LA TENSIÓN (MPa)	ELONGACIÓN (%)
BIOPELICULAS DE CELULOSA BACTERIANA	16266	229	1.8
BIOPELÍCULA TPS DE ARRACACHA	463	10.1	32
BIOPELICULA TPS DE MAIZ	14	0.9	108
BIOPELICULAS TPS DE PLATANO	203	15.9	16.81
ECOVI0-BASF	137	6.96	210
TPS/PLA	378	4.8	5.7
100% PLA	2050	68.4	9.4
LDPE	400	12	600

Fuente: (Berenice et al., 2017; Cuervo, Chaparro, & Sanabria, 2012; Echeverría, 2012; Palma-rodríguez et al., 2017; Pardo Cuervo & Velasco Mosquera, 2012; Quiroga, 2011; Rydz, Musioł, Zawidlak-w, & Sikorska, 2018).

Las biopelículas que contenían urea y agua destilada como plastificante tienen una elongación menor, con respecto a las que se les adiciono glicerina, porque la urea hace

que se produzca plastificación de las cadenas poliméricas del almidón y mejora propiedades como resistencia a tensión y módulo de elasticidad, que permite al material ser sometido a amplios esfuerzos y retomar su forma inicial sin deformarse, sin embargo, la elongación del material se ve disminuida y no tiene cambios significativos con la variación de los porcentajes de plastificantes en este caso la urea y agua destilada, otro factor que contribuye a los bajos porcentajes de elongación obtenido es el porcentaje de amilosa que se determinó en el almidón extraído de la arracacha, puesto que para obtener TPS se opta por almidones con bajos contenidos de amilosa y altos contenidos de amilopectina, ya que este le confiere al TPS la estructura polimérica.

Propiedades como módulo de elasticidad y resistencia se ven favorecidos con el aumento del porcentaje de agua destilada adicionada en cada combinación, ya que, si se comparan las biopelículas Mx2 de la comb. 2, Mx1 de la comb. 4 y Mx2 de la comb. 5, cuyas cantidades de agua fueron 9, 35 y 42%, respectivamente, se observa en la tabla 11, de manera similar se nota un aumento en el módulo y la resistencia, comportamiento que contradice lo enunciado por (Sriroth et al., 2016) quien afirma que el aumento en las cantidades de agua tiene una incidencia negativa en las propiedades del material, basado en biopelículas obtenidas de almidón de cassava y adición de glicerol, cuyos desempeño no fue óptimo.

En la tabla 12, se detallan de acuerdo a diversos autores las propiedades mecánicas como módulo de elasticidad, resistencia a la tensión y elongación de varios tipos de materiales, producidos experimentalmente y otros de uso comercial como el LDPE, el cual es altamente flexible, pero de baja resistencia; los valores de las biopelículas obtenidas a partir del almidón muestran un rango de comportamiento bastante amplio, puesto que existen muchos factores que hacen que estas varíen, dentro de las que cabe resaltar la procedencia del almidón, la relación amilosa/amilopectina y el plastificante empleado.

3.7. Biodegradabilidad



Figura 44. Biopelículas expuestas al ambiente día 1.



Figura 44. Biopelículas expuestas al ambiente día 2.

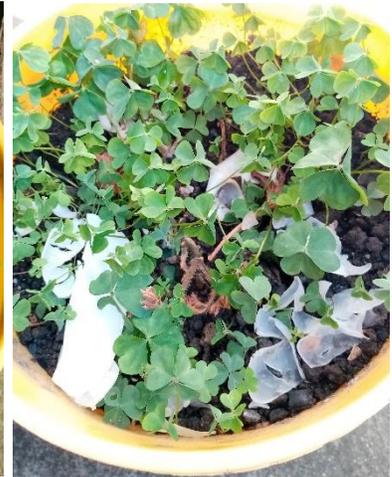


Figura 45. Biopelículas expuestas al ambiente día 3.

Para evaluar la biodegradabilidad de las muestras se seleccionaron las mismas biopelículas que se sometieron a las pruebas mecánicas; físicamente las muestras dejadas a la intemperie mostraron una rápida descomposición, figuras 43-49, se denota un gran cambio del día 1 al 2 en su aspecto principalmente en las muestras Mx3 de la comb. 2, Mx2 y Mx4 de la comb. 3, Y Mx3 de la comb. 4, de acuerdo a el análisis de infrarrojo, todas las muestras tienen un alto contenido de grupos $-OH$ que las hace muy polar y de fácil desintegración, al tener contacto con factores atmosférico como la humedad del aire y la lluvia.



Figura 47. Biopelículas expuestas al ambiente día 4.



Figura 46. Biopelículas expuestas al ambiente día 5.



De las biopelículas estudiadas Mx2 comb. 5, mostro una relativa resistencia a biodegradarse, pasados los 7 días en los que se llevó a cabo la prueba, mientras que las otras muestras una vez transcurrido este tiempo que se degradaron casi por compuesto, cabe resaltar que las plantas sobre la que se depositaron las biopelículas, no sufrieron afectación en su aspecto físico, y se observó un incremento progresivo de su tamaño en los días en los que las biopelículas permanecieron en la maceta, este buen desempeño se debe al uso de la urea en las muestras; es de amplio conocimiento que este tipo de compuestos es empleado como fertilizante en muchos cultivos y variedad de planta por su contenido de nitrógeno, el cual es un nutriente esencial en el metabolismo de muchos seres vivos, incluidas las plantas. Adicional a esto, las bandas de alrededor de $\sim 1620 \text{ cm}^{-1}$ muestra una deformación de los N-H lo cual favorece su separación y posterior disociación en el suelo o planta que lo contenga.

Las biopelículas al ser susceptible a la desintegración en presencia de agua, no puede ser empleada en alimentos, con alto contenido de humedad o desprendimiento de líquidos.



Figura 49. Biopelículas expuestas al ambiente día 6.



Figura 48. Biopelículas expuestas al ambiente día 7.

3.8. Aplicación industrial

En el software CES-EDUPACK, se evaluaron las muestras Mx2 de las comb. 3 y 5, Mx4 de la comb. 5, por presentar marcados grupos alifáticos lo que le conceden las mejores propiedades mecánicas entre las muestras evaluadas.

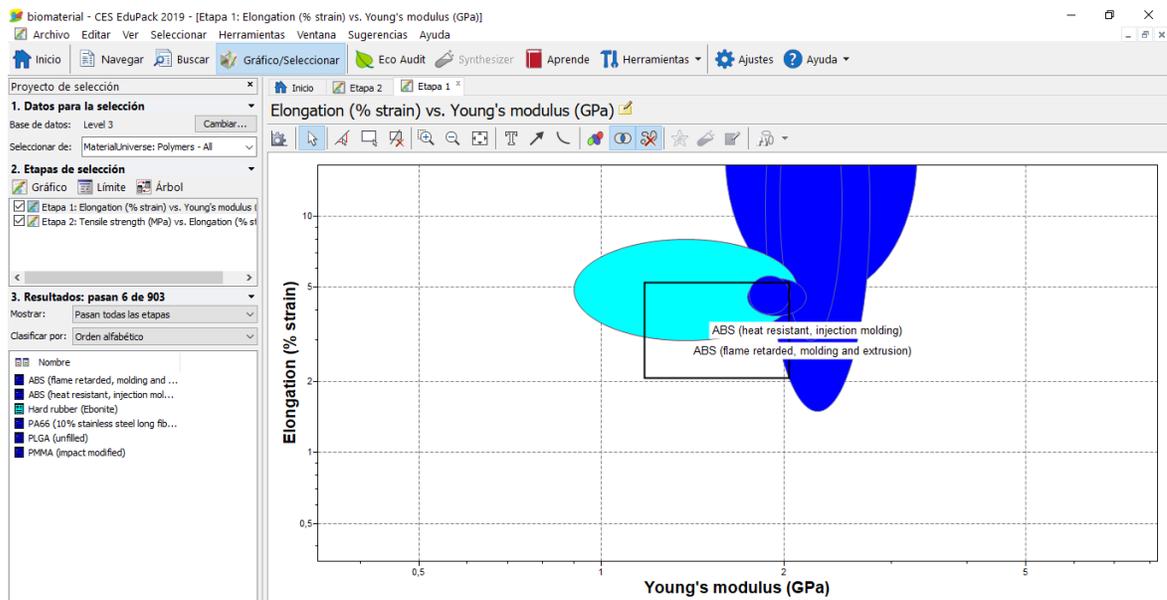


Figura 50. Gráfico representativo de las propiedades de la biopelícula Mx2 de la combinación 3.

La figura 50 presenta los materiales que tienen propiedades que se asemejan a las exhibidas por el material de la muestra F1, alrededor de 14, empleados como revestimiento interior, aislamiento, embalajes, paneles de visualización, partes mecánicas generales. Asimismo, las propiedades mecánicas de las biopelículas Mx2 y Mx4 de la combinación 5, ya que estas tienen propiedades similares con puntos cercanos, se evaluaron en el mismo gráfico mostrado en la figura 51; existen 6 materiales que presentan propiedades similares a estas biopelículas, de los cuales las aplicaciones que se ajustan a estas propiedades son: en empaques, embalajes, mangos de herramientas y accesorios de iluminación. Estas muestras se encuentran dentro de los rangos de propiedades mecánicas de materiales como PE, PP, ABS, PVC, entre otros, lo que es un buen indicativo en cuanto a la potencial aplicación de los mismos. De las opciones para la aplicación de las biopelículas, expuestas por el software CES-EDUPACK el uso de esta en embalaje es la opción más adecuada

teniendo en cuenta las propiedades del material y su comportamiento, y su marcada afinidad por los grupos –OH lo que les confiere higroscopicidad.

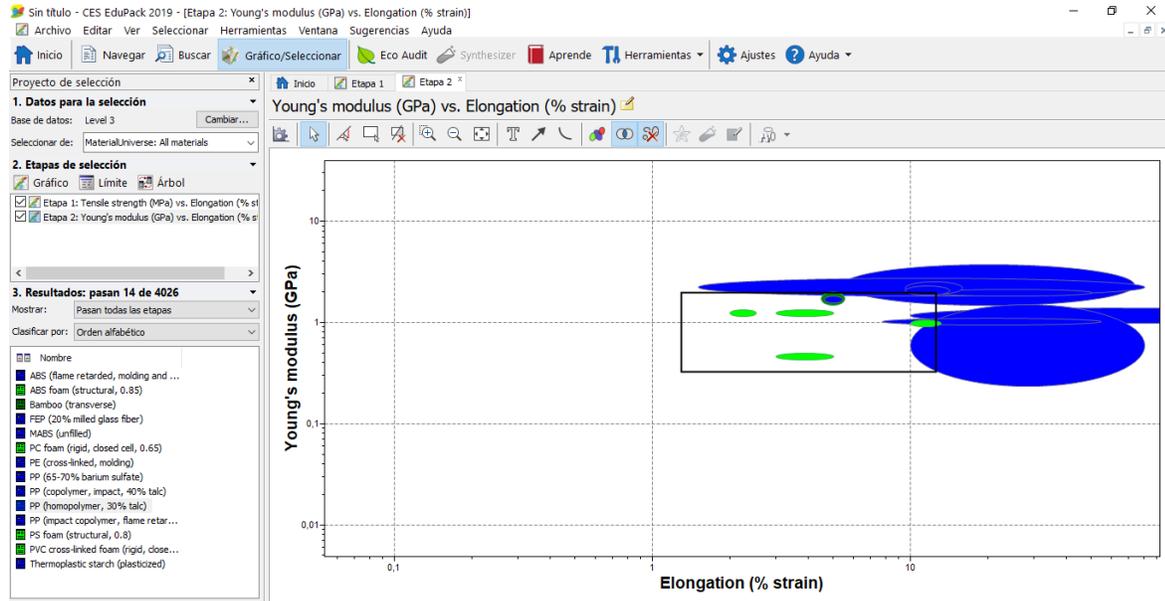


Figura 51. Gráfico representativo de las propiedades de las biopelículas Mx2 y Mx4 de la combiación 5.

CONCLUSIONES

Durante el desarrollo de esta investigación se logró concluir que:

- En el proceso de extracción de almidón los mejores rendimientos se obtuvieron con una relación de arracacha: agua destilada 1:3, puesto que a mayor proporción hay más pérdidas de los gránulos de almidón en el agua residual.
- Los gránulos de almidón de arracacha amarilla, tienen una forma poliédrica redondeada con un tamaño promedio de 7,75 μm en un rango que va de 1-25 μm , lo que condiciona el contenido de amilosa, la temperatura de gelatinización que debido al tamaño de los gránulos es la de menor valor entre los almidones extraídos de tubérculos, la absorción y solubilidad en agua.
- Las biopelículas con glicerina y agua destilada como plastificante no desarrollaron plastificación, sin embargo, en combinación con urea se logró la plastificación con buenas propiedades, ya que la glicerina en este caso aporta flexibilidad, si se encuentra en pequeñas cantidades.
- La temperatura de procesamiento es un factor importante para obtener óptimas propiedades. A temperatura ambiente, el plastificante no logra adherirse a las cadenas poliméricas del almidón siendo necesario emplear temperaturas superiores, cercanas a la temperatura de gelatinización, ya que, cuando se tienen temperaturas que la exceden, la estructura del polímero tiende a degradarse, perdiendo las propiedades, que se busca mejorar con la adición de los plastificantes.
- El agua destilada es indispensable para alcanzar una buena gelatinización y desestructuración del almidón, a mayor cantidad de ella, mejor son las propiedades mecánicas del material.
- La proporción almidón-plastificante no tiene incidencia en los porcentajes de elongación del material TPS, este factor está ligado a los componentes de la mezcla y no en la cantidad empleada.
- Todas las biopelículas obtenidas mostraron una degradación casi completamente en corto tiempo a condiciones ambientales, no obstante, las biopelículas con mayores cantidades de agua mostraron una mejor resistencia a la degradación. Las combinaciones pueden ser usadas en compostajes por el contenido de nitrógeno en su estructura, que funciona como nutriente del suelo.
- Las propiedades evaluadas de las biopelículas muestran que la aplicación más compatible con su comportamiento es su uso en embalajes.

BIBLIOGRAFÍA

- Acosta, A., & Blanco, C. (2013). *OBTENCION Y CARACTERIZAION DE ALMIDONES NATIVOS COLOMBIANOS PARA SU EVALUACION COMO POSIBLES ALTERNATIVAS EN LA INDUSTRIA ALIMENTARIA*. 1–110.
- Adarve-Cobo, M., & Mejia, L. (2012). *OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DE ALMIDÓN FERMENTADO DE ARRACACHA (Arracacia*.
- Adevale, K., & Olabisi, O. (2016). *Handbook of Thermoplastics* (second). CRC Press.
- Alayo Sánchez, B. (2015). Caracterización fisicoquímica y reológicas del almidón de la arracacha (*Arracacia xanthorrhiza*) variedad amarilla procedente de la Provincia de San Ignacio - Departamento de Cajamarca. *Universidad Cesar Vallejo*.
- Aliaga, M., & Sanchez, G. (2015). *Influencia de las proporciones de harina de arracacha (Arracacia xanthorrhiza) y de harina de trigo (Triticum aestivum) sobre las propiedades fisicoquímicas y nutricionales de las galletas para consumo humano*. Retrieved from http://dspace.unitru.edu.pe/bitstream/handle/UNITRU/3282/AliagaEscalante_M - SanchezCastro_G.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Almario, A., Durango, L., & Arizal, E. (2018). *Estudio de las propiedades absorbentes de un biopolímero a base de almidón de yuca (Manihot esculenta Crantz)*.
- American Society for Testing and Materials. ASTM. (2002). *Designación D 882: "Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting"*. 14, 1–10.
- Aristizábal, J., & Sánchez, T. (2007). *Guía técnica para producción y análisis de almidón de yuca*. *Boletín de servicios agrícolas de la FAO 163*. Retrieved from <http://www.fao.org/3/a-a1028s.pdf>
- Ashter, S. A. (2016). *Introduction to Bioplastics Engineering* (E. Sevier, Ed.). Retrieved from <https://books.google.com.co/books?id=2TWTcGAAQBAJ&pg=PA254&dq=polycaprolactone+bioplastic&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwiRp6fJj7DIAhVrrIkKHUY0AaAQ6AEIMTAB#v=onepage&q=polycaprolactone+bioplastic&f=true>
- Avil, G. R. (2006). *Obtenci ´ on y caracterizaci ´ on de un pol ´ imero biodegradable a partir del almid ´ on de yuca*.
- Avil, & Ruiz, G. (2005). *Polímeros Biodegradables a. 1*, 15–22.
- Beltran, M., & Marcilla, A. (2012). *tecnologia de polimeros. Procesado y materiales*. Retrieved from https://books.google.com.co/books?id=jxilUUn4_QAC&pg=PA66&dq=aditivos+espu

- mantes+para+plasticos&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEWjYkZeHtv7kAhUIw1kKHapaAkwQ6AEILzAB#v=onepage&q=aditivos espumantes para plasticos&f=true
- Benavente, R., & Madrid, C. (1997). *Polímeros amorfos, semicristalinos, polímeros cristales líquidos y orientación*.
- Berenice, Z., Carballo, C., & Ciencias, D. E. N. (2017). *Obtención y caracterización de almidones termoplásticos obtenidos a partir de almidones injertados con poliésteres biodegradables*.
- Berg, J., Tymoczko, J., & Stryer, L. (2007). *Bioquímica* (sexta). Retrieved from <https://books.google.com.co/books?id=HRr4MNH2YssC&pg=PA661&dq=urea&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwi-84fHosXIAhUIqIkKHckYAPQQ6AEIPDAD#v=onepage&q=urea&f=false>
- Besednjak, A. (2005). *Materiales compuestos procesos de fabricacion de embarcaciones* (S. Universitat Politècnica de Catalunya, Ed.). Retrieved from <https://books.google.com.co/books?id=gMSg5rURr6sC&pg=PA20&dq=clasificacion+de+los+polimeros+segun+su+origen&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEWjblszRwejkAhVxhOAKHVhhAFcQ6AEIKTAA#v=onepage&q=clasificacion de los polimeros segun su origen&f=true>
- Beyer, H., & Walter, W. (1987). *Manual de química orgánica*. Retrieved from <https://books.google.com.co/books?id=Pm7INZzKlaoC&pg=PA488&dq=celulosa&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEWjNmYeg6vflAhXQs1kKHdJoCmkQ6AEIKTAA#v=onepage&q=celulosa&f=true>
- Biom, M., & Biodegradables, M. (2016). *ANEXO C : POLÍMEROS BIODEGRADABLES APLICACIONES EN SUTURAS QUIRÚRGICAS*.
- Braun, D., Cherdron, H., & Ritter, H. (2001). *Polymer synthesis: theory and practice* (3rd ed.). Retrieved from <https://books.google.com.co/books?id=NqCmQSpmsRIC&pg=PA312&dq=plasticizer s+in+polymers&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwiDkPCB0f7kAhVOmlkKHT4ICrQQ6AEIMjAB#v=onepage&q=plasticizers in polymers&f=true>
- Burgos Oliveros, H., Carlos Chávez Pereda, I., José Julca Hashimoto, I. L., & Amaya Robles, J. E. (2006). *GERENCIA REGIONAL DE RECURSOS NATURALES Y GESTIÓN DEL MEDIO AMBIENTE A A R R R R A A C C A A C C H H A A*

- (*Arracacia xanthorrhiza* Bancroft) GERENTE REGIONAL DE RECURSOS NATURALES Y GESTION DEL MEDIO AMBIENTE. Retrieved from www.regionlalibertad.gob.pe
- Cabezas Serrano, A. B. (2013). *Estrategias dirigidas a retrasar el pardeamiento enzimático en productos destinados a la IV Gama: alcachofas y patatas*. 196. Retrieved from <http://helvia.uco.es/xmlui/bitstream/handle/10396/9760/2013000000729.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Callister, W. (2007). *Materials Science Engineering. An Introduction*. (3rd ed.). New York: John Wiley & son, Inc.
- Carolina, A., Brait, V., Alexandre, J., Henrique, L., Mattoso, C., & Manoel, J. (2017). Biodegradable blends of urea plasticized thermoplastic starch (UTPS) and poly (ϵ -caprolactone) (PCL): Morphological , rheological , thermal and mechanical properties. *Carbohydrate Polymers*, 167, 177–184. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.03.051>
- Carrera, P. F. I. N. D. E. (2009). *PFC_Javier_Mere_Marcos*.
- Castillo, F. (2005). *Biotecnología Ambiental*. Retrieved from https://books.google.com.co/books?id=19ffPAm3E3kC&pg=PA422&dq=poliesteres+alifaticos+polimeros+biodegradables&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwjP6rL_p6fIAhXIV98KHSKFCzMQ6AEIKTAA#v=onepage&q&f=true
- Cuad, E. (2011). *Nueva aparcería en la producción de arracacha (arracacia xanthorrhiza) en Cajamarca (Colombia) * production d ' arracacha (Arracacia*. 8, 205–228.
- Cuervo, O. H. P., Chaparro, W. A., & Sanabria, W. M. (2012). *Efecto de la modificación del almidón de arracacha y la concentración del plastificante sobre las propiedades mecánicas de películas biodegradables Effect of arracacha starch modification and plasticizer concentration on the mechanical properties of biode*. 10(1), 37–43.
- DANE. (2015). *El Cultivo De La Arracacha (Arracacia Xanthorrhiza Bancroft), Hortaliza De Grandes Bondades Nutricionales Y De Alta Potencialidad Agroindustrial. Septiembre*, 1. Retrieved from https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/agropecuario/sipsa/Bol_Insumos_sep_2015.pdf
- De, T. D. E. F. I. N., Qu, D. D. E., & Org, M. (2017). “ *GLICEROL : SÍNTESIS Y APLICACIONES .*”

- Destilada, A., Av, D. E. C. V, No, L., Apdo, M. N., & Desionizada, A. (2017). *Hoja de datos de seguridad agua destilada 1*.
- Dos Santos, F. (2004). *Manejo de semilla y uso de almacigo en el cultivo de la Arracacha*. Retrieved from <https://books.google.com.co/books?id=0afysnKCK3EC&pg=PA7&dq=la+arracacha&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwjBidmxv93kAhUsuVkkHVWYDI8Q6AEILjAB#v=onepage&q&f=true>
- Echeverría, I. (2012). *Tesis Doctoral Materiales biodegradables en base a proteínas de soja y montmorillonitas*.
- Eduardo, C., & Alzate, O. (2016). *Aplicaciones de mezclas de biopolímeros y polímeros sintéticos : revisión bibliográfica Applications of biopolymers and synthetic polymers blends : literature review*. (25), 252–264. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.RC.2016.25.a9>
- Ege, S. (2004). *Química orgánica, volumen 2*. Retrieved from <https://books.google.com.co/books?id=a0q3bMk5UrgC&pg=PA1180&dq=celulosa&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwjNmYeg6vflAhXQs1kKHdJoCmkQ6AEIMTAB#v=onepage&q=celulosa&f=true>
- Enriquez, M., Velasco, R., & Ortiz, V. (2012). *COMPOSICIÓN Y PROCESAMIENTO DE STARCH-BASED BIODEGRADABLE FILMS . COMPOSIÇÃO E TRANSFORMAÇÃO DE*. 10(1), 182–192.
- Enzimática, V. Í. A., Almidón, D. E. L., D, D. E. Ñ., L, U. T., & Tipo, L. (2008). *EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MODIFICADAS POR VIA ENZIMATICA DEL ALMIDON DE ÑAME (D. trifida) UTILIZANDO a-AMILASA (TERMAMYL 120 L, TIPO L)*. 15(47), 51–60.
- Estrada, C. (2011). *Cruz Estrada Carolina. Celulosa. UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MÉXICO FACULTAD DE QUÍMICA QUÍMICA DE ALIMENTOS I*. (Mcc).
- FAO. (2004). *POLYVINYL ALCOHOL (PVA)*. 1(3), 3–5.
- Fuller Kotcher, J. (2009). *Instrumentación quirúrgica: Teoría, técnicas y Procedimientos* (4th ed.). Retrieved from <https://books.google.com.co/books?id=yBwepEJsQZQC&pg=PA361&dq=acido+poliglicolico&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwiUu8->

- xqafIAhVuiOAKHUjIDxAQ6AEINTAC#v=onepage&q=acido poliglicolico&f=true
- Galicia, L., Miranda, A., Gutiérrez, M. G., Custodio, O., Rosales, A., Ruíz, N., & Surlés, R. (2012). *Protocolos de laboratorio*. Mexico: Centro internacional de mejoramiento de maiz y trigo.
- García Méndez, A. D., & Pacheco de Delahaye, E. (2007). Evaluation of wafer type sweet cookies based upon arracacha flour (*Arracacia xanthorrhiza* B.). *Revista Facultad Nacional de Agronomía, Medellín*, 60(2), 4195–4212. Retrieved from <http://www.agro.unalmed.edu.co/publicaciones/revista/docs/Art.%5Cn20%5CnEvaluacion%5Cngalletas.pdf>
- Göktürk, E., & Erdal, H. (2017). *Biomedical applications of polyglycolic acid (PGA) Poliglikolik Asit ' in (PGA) Biyomedikal uygulamaları*. 21(6), 1237–1244. <https://doi.org/10.16984/saufenbilder.283156>
- Gonz, M. (n.d.). *Propiedades químicas y físicas de polímeros*.
- Gregori, B., Alba, L., Brown, A., Fernandez, M., Bordado, J., De la Hoz, Y., & Alvarez, A. (2007). *Los poliuretanos biodegradables. Estudio bibliografico de su sintesis y aplicaciones*. Retrieved from <https://www.redalyc.org/pdf/2231/223114970002.pdf>
- Gutierrez, J. (2000). *Ciencia bromatológica: Principios generales de los alimentos*. Retrieved from <https://books.google.com.co/books?id=94BiLLKBJ6UC&pg=PA323&dq=pardeamiento+enzimatico+de+la+arracacha&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwibx47VoaLIAhVBnlkKHfE1DaUQ6AEIKTAA#v=onepage&q&f=true>
- Gutierrez, T. (2019). *Polimeros: Generalidades y tendencias de investigacion en Colombia*. Retrieved from <https://books.google.com.co/books?id=XoewDwAAQBAJ&pg=PA18&dq=polimeros+homopolimeros+y+copolimeros&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwi2kqHvkzkaAhUnwVkkKHcoUCZcQ6AEIMzAC#v=onepage&q&f=true>
- Hernandez, A. (2003). *Microbiología industrial*. Retrieved from <https://books.google.com.co/books?id=KFq4oEQQjdEC&pg=PA185&dq=procesos+de+gelatinización+del+almidón&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwjibX9kbXIAhWI1FkKHfaXCcAQ6AEIKTAA#v=onepage&q=procesos+de+gelatinización+del+almidón&f=true>
- Herrera, A. (2003). Evaluacion de la influencia del grado de acetilacion del almidon de

- arracacha (arracacia xanthorriza) sobre algunas de sus propiedades fisicoquímicas. *Journal of Gastroenterology*, Vol. 38, pp. 104–105.
<https://doi.org/10.1007/s005350300016>
- Ibrahim, K. A., Naz, M. Y., Sulaiman, S. A., & Ghaffar, A. (2017). *Effect of Urea and Borate Plasticizers on Rheological Response of Corn Starch*. (September).
<https://doi.org/10.3390/polym9090361>
- Ibrahim, M. I. J., Sapuan, S. M., Zainudin, E. S., & Zuhri, M. Y. M. (2019). Preparation and characterization of cornhusk/sugar palm fiber reinforced Cornstarch-based hybrid composites. *Journal of Materials Research and Technology*, (x x), 1–12.
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.10.045>
- Identificación, S. (2010). *Hoja de seguridad Urea MSDS*. 1–6.
- Jiménez-munguía, M. F. D. M. T. (2012). *Películas comestibles formuladas con polisacáridos : propiedades y aplicaciones*. 2, 110–121.
- Koolman, J., & Rohm, K.-H. (2004). *Bioquímica texto y atlas* (3rd ed.). Retrieved from <https://books.google.com.co/books?id=f61Mvd-vl60C&pg=PA40&dq=polisacáridos&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwjE9eCTq47IAhVxp1kKHZfuDsUQ6AEILjAB#v=onepage&q=polisacáridos&f=true>
- Kumar, P., & Sonia. (2016). Green Plastic: A New Plastic for Packaging. *International Journal of Engineering Science & Research Technology*, 5(7), 778–781.
<https://doi.org/10.5281/zenodo.61482>
- Leonel, M., & Cereda, M. P. (2002). *CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA*. 22(1), 65–69.
- Liendo, J., & Perdomo, B. (2011). *Uso de almidón de apio (Arracacha xanthorriza B .) en colados de durazno (Prunus persica L .)*. 37(3), 93–104.
- Liliana, S., Docente, A., Yory, L., & Docente, S. (2018). *Aprovechamiento de recursos renovables en la obtención de nuevos materiales Use of renewable resources to obtain new materials*. 9(1). <https://doi.org/10.21500/20275846.3008>
- Lucía Fernández-Espada Ruiz Departamento De Ingeniería Química. (2016).
- Luengo, J. M. (2018). *A FONDO Bioplásticos de origen bacteriano : los poli-hidroxi-alcanoatos*. 3021, 5–24.
- Mariano. (2011). Aditivos y rellenos para polímeros. Retrieved from <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/02/aditivos-y-rellenos-para-polimeros.html>

- Máster, T. D. E. F. I. N. D. E. (2018). *Polímeros biodegradables . Importancia y potenciales aplicaciones.*
- Mendoza, D., & Amezcua, F. (2009). *Apendices IR.pdf.*
- Minagricultura. (2019). Reporte: Área, producción y rendimiento nacional por cultivo. Retrieved from <https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=1>
- Nacional, P., & Agroindustriales, D. P. (2002). *La Harina de Arracacha.*
- Niaonakis, M. (2015). *Biopolimers: Processing and products.* EL SEVIER.
- Ochoa, L. (2010). *TECNOLOGÍAS LOCALES DE PRODUCCIÓN DE ARRACACHA (Arracacia xanthorrhiza Bancroft) EN EL MUNICIPIO DE BOYACÁ , DEPARTAMENTO DE BOYACÁ LOCAL TECHNOLOGIES OF ARRACACHA (Arracacia xanthorrhiza Bancroft) PRODUCTION AT BOYACÁ , DEPARTMENT OF BOYACÁ.* 125–133.
- Oropeza, R., Montes, A., & Padron, C. (2016). *Revisión Películas biodegradables a base de almidón : propiedades mecánicas , funcionales y biodegradación Biodegradable films based on starch : mechanical / functional properties and.* (October).
- Outline, C. (2019). *Starches: Molecular and Granular Structures and Properties.* <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812069-9.00006-6>
- Pacheco-Delahaye, E., & Testa, G. (2005). *Evaluación nutricional, Física y sensorial de panes de trigo y plátano verde.*
- Palma-rodríguez, H., Salgado-delgado, R., & Páramo-calderón, D. (2017). *Caracterización parcial de películas biodegradables elaboradas con almidón de plátano y proteínas séricas de la leche.* <https://doi.org/10.15174/au.2017.1215>
- Pardo Cuervo, O. H., & Velasco Mosquera, R. (2012). Physicochemical and mechanical properties of film obtained from native and oxidized arracacha starch. *Revista ION*, 25(SPE), 23–29.
- Pedro, B., & Mostacero, J. (2001). *Efecto de temperatura, tiempo y tamaño de partícula en la elaboración de almidón de la arracacha (Arracacia Xanthorrhiza).*
- Perez, F. (2017). *Dextrinas a partir de almidón de arracacha (Arracacia xanthorrhiza) por hidrólisis enzimática.* (July 2007).
- Perez, M., & Perez, A. (2010). *Polyamides and polyesteramides with potential application in biomedicine.* Retrieved from <https://www.redalyc.org/pdf/1815/181517930008.pdf>
- Perilla, J. E. (1998). *Tendencias en la Síntesis de Alcohol Polivinílico de Alto Peso Molecular.* 29–32.
- Peroni, F. (2003). Características estruturais e físico-químicas de amidos obtidos de

- diferentes fontes botânicas. *Aleph*.
- Pinto, H. M. A. (2012). Extracción, caracterización y aplicación de almidón de ñame variedad blanco (. *Extraccion, Caracterizacion y Aplicacion de Almidon de Ñame Variedad Blanco (Discorea Trifida) Originario de La Region Amazonica Colombiana Para La Elaboracion de Productos Horneados*.
- Pratt, S., Halley, P. J., Chan, C. M., Vandi, L., Pratt, S., Halley, P., ... Pratt, S. (2017). *Composites of Wood and Biodegradable Thermoplastics : A Review Composites of Wood and Biodegradable Thermoplastics : A Review*. (November).
<https://doi.org/10.1080/15583724.2017.1380039>
- Quiminet. (2017). Las ventajas de espumar materiales plásticos. Retrieved from <https://www.quiminet.com/articulos/las-ventajas-de-espumar-materiales-plasticos-4272555.htm>
- Quinto, D. A., Solano, M. Q., & Silva, C. E. (2015). *EXTRACCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL ALMIDÓN DE TRES VARIEDADES DE QUINUA (Chenopodium quinoa Willd) NEGRA COLLANA , PASANKALLA ROJA Y BLANCA JUNÍN EXTRACTION AND CHARACTERIZED STARCH THREE VARIETIES OF QUINOA (Chenopodium quinoa Willd) BLACK COLLANA , RE. 81(1), 44–54*.
- Quiroga, R. M. (2011). *Metodología para la caracterización termo-mecánica de películas plásticas biodegradables of biodegradable plastic films*. 46–51.
- Ramírez-corona, N. (2017). *Effect of short wave ultraviolet radiation on selected properties of edible films formulated with pomegranate juice and chitosan*. (October).
- Ramírez, J. F., Vélez, Pomeón, T., & Velásquez, Susana Andrea (Facultad de Química, U. (2008). Fundamentos y Técnicas de Análisis de alimentos. La Química y la Alimentación. *Temas Selectos De Ingeniería De Alimentos*, 2, 1–20. Retrieved from http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/FUNDAMENTOSYTECNICASDEANALISISDEALIMENTOS_12286.pdf%0Awww.quimicaysociedad.org%0Ahttp://web.udlap.mx/tsia/files/2013/12/TSIA-62Ramirez-Lopez-et-al-2012.pdf%0Ahttp://www.fquim.us.es/portal/C20/descargas/Uno/Id/T2204
- Rana, M. K., & Kumar, S. (2017). Arracacha. *Vegetable Crops Science*, 923–932.
<https://doi.org/10.1201/9781315116204-102>
- Rivera Varón, J. J., Garnica Montaña, J. P., Rubio Bonilla, S. L., Lozano Tovar, M. D., Rosero Erazo, J. A., Trujillo Callejas, L. Y., & Herrera Sánchez, Y. A. (2015). *Recomendaciones tecnológicas para la producción de semilla de calidad de arracacha (Arracacia xanthorrhiza Bancroft) Manejo fitosanitario de la semilla*

vegetativa de arracacha.

- Rojo Callejas, F. (2000). Tablas de Espectroscopía Infrarroja. *Facultad de Química - Departamento de Programas Audiovisuales*, 14. Retrieved from http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/TablasIR_15437.pdf%0Ahttp://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/IRTablas_33080.pdf
- Rydz, J., Musioł, M., Zawidlak-w, B., & Sikorska, W. (2018). Polymers for Food Packaging Applications. In *Biopolymers for Food Design*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811449-0/00014-1>
- Salas Cuestas, S. (2018). Caracterización físico-química y propiedades funcionales del almidón de arracacha (*Arracacia xanthorrhiza*) modificado por irradiación UV-C. *第24回大学教育研究フォーラム予稿集*, 121.
- Salcedo Mendoza, J. G., Figueroa Flórez, J. A., & Hernández Ramos, E. J. (2017). *Agroindustria de productos amiláceos II: Métodos y técnicas de caracterización*.
- Sanchez, E., & Alvarado, O. (2015). *Obtención de un polímero biodegradable a partir de la mezcla de alcohol polivinílico y amilosa extraída del almidón de colocasia esculenta (VITUCA) proveniente del distrito de Yambrasbamba*.
- Sanchez, T., García, O., & Pinzón, M. (2012). *ELABORACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE PELÍCULAS DE ALMIDÓN DE YUCA (Manihot esculenta) VARIEDAD ICA*.
- Schmind, S., & Kalpakjian, S. (2002). *Manufactura, ingeniería y tecnología*. (cuarta). Retrieved from https://books.google.com.co/books?id=gilYI9_KKAoC&pg=PA195&dq=plasticos+biodegradables&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwjJ5IbcjuPkAhWkTt8KHZ_5A_wQ6AEIKTAA#v=onepage&q=plasticos+biodegradables&f=true
- Seguridad, F. D. E. D. D. E., Identificación, S., Producto, D. E. L., Compañía, Y. D. E. L. A., A. G. T. M. E. S. S., Panamericana, A. C., ... Rey, C. (2017). *Ficha de datos de seguridad*. (Categoría 4).
- Seminario, J. (2004). *Raíces andinas: contribuciones al conocimiento y a la capacitación*. Retrieved from <https://books.google.com.co/books?id=L-sz8Eir9IIC&pg=RA2-PT246&dq=pardeamiento+enzimatico+de+la+arracacha&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwibx47VoaLIAhVBnlkKHfE1DaUQ6AEIODAC#v=onepage&q=pardeamiento+enzimatico+de+la+arracacha&f=true>
- Smith, O., & Ristol, S. (1972). *química orgánica* (Reverte, S, Vol. 2). Retrieved from

- <https://books.google.com.co/books?id=g0PbE-T9x3cC&pg=PA742&dq=ALMIDON&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwiAiL-nmOHkAhXLdN8KHx9CAAn8Q6AEINDAC#v=onepage&q=ALMIDON&f=false>
- Sriroth, K., Chollakup, R., & Piyachomkwan, K. (2016). *538 biodegradable plastics from cassava starch in thailand*. 538–553.
- Tako, M., Tamaki, Y., Teruya, T., & Takeda, Y. (2014). *The Principles of Starch Gelatinization and*. (July 2015). <https://doi.org/10.4236/fns.2014.53035>
- Tester, R. F., Karkalas, J., & Qi, X. (2004). *Starch — composition , fine structure and architecture*. 39, 151–165. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2003.12.001>
- Torres, B., Manuel, J., Adileily, O. J., & A, T. M. (2019). *Síntesis y caracterización de poliuretanos biodegradables*. (March).
- Tunkasiri, T. (2012). *Biomaterials and applications*. Retrieved from https://books.google.com.co/books?id=cUixDwAAQBAJ&pg=PA331&dq=PBAT+ecoflex&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwiW5fyYws_IAhVCi1kKHf02BUcQ6AEIMzAB#v=onepage&q=PBAT+ecoflex&f=true
- University, O. (2003). *Diccionario de Química*. Retrieved from <https://books.google.com.co/books?id=VmdvQfFbq9UC&pg=PA20&dq=agua+destilada+que+es&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwiRyMuD2cflAhVpvlkKHd3vA-AQ6AEINzAC#v=onepage&q=agua+destilada+que+es&f=true>
- Ventures, T. (2007). *A c t i v i d a d e s 2 0 0 7 Entidades Constituyentes*. (May 2014).
- Vigil, Y. M. A. L. (2013). *Biopolímeros y su integración con polímeros convencionales como alternativa de empaque de alimentos*. 42–52.
- Villada, H. S., Acosta, H. A., & Velasco, R. J. (2008). Investigación de almidones termoplásticos, precursores de productos biodegradables. *Informacion Tecnologica*, 19(2), 3–14.
- Virtual, P. (2005). *RED PERUANA DE ALIMENTACIÓN Y NUTRICIÓN (r-PAN) PUBLICACIÓN VIRTUAL 008 TITULO: CARACTERÍSTICAS NUTRICIONALES DE LA ARRACACHA*.
- Wang, L., Xie, B., Shi, J., Xue, S., Deng, Q., Wei, Y., & Tian, B. (2010). Physicochemical properties and structure of starches from Chinese rice cultivars. *Food Hydrocolloids*, 24(2–3), 208–216. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2009.09.007>
- Wypych, G. (2004). *Plasticizers*.
- Zhang, Z., Ortiz, O., Goyal, R., & Kohn, J. (2014). chapter 13 : Biodegradable Polymers.

In *Handbook of Polymer Applications in Medicine and Medical Devices*.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-323-22805-3.00013-X>