UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

LA MOLINA

FACULTAD DE INDUSTRIAS ALIMENTARIAS

"ELABORACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE PELÍCULAS BIODEGRADABLES DE ALMIDONES DE PAPAS NATIVAS Y GOMA DE TARA"

TESIS PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS

STHEFANY MARGARITA OTERO CHUNGA

LIMA - PERÚ

2025

La UNALM es titular de los derechos patrimoniales de la presente investigación (Art. 24. Reglamento de Propiedad Intelectual)

11% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Coincidencias menores (menos de 15 palabras)

Fuentes principales

9%	Fuentes de Internet
2%	Publicaciones
6%	Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alerta de integridad para revisión

Caracteres reemplazados
42 caracteres sospechosos en N.º de páginas
Las letras son intercambiadas por caracteres similares de otro alfabeto.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA
FACULTAD DE INDUSTRIAS ALIMENTARIAS

"ELABORACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE PELÍCULAS BIODEGRADABLES DE ALMIDONES DE PAPAS NATIVAS Y GOMA DE TARA"

Presentado por:

STHEFANY MARGARITA OTERO CHUNGA

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO EN INDUSTRIAS b el siguiente jurado:

_____

Luis Fernando Vargas Delgado, PhD.

PRESIDENTE

Marianela Sonia Inga Guevara, PhD.	Mg. Sc. Diana María Nolazco Cama
MIEMBRO	MIEMBRO
Dra. Indira Milagros Betalleluz Pallardel	Mg. Sc. Mirtha Patricia Martínez Tapia
ASESORA	CO-ASESORA

LIMA - PERÚ

2025

DEDICATORIA

A mi mamá, Madeleine, por estar siempre a mi lado, por acompañarme en mis desvelos durante mi época universitaria, por tu apoyo incondicional y tu infinita paciencia. Gracias por motivarme a seguir adelante sin rendirme, por enseñarme a encontrar lo mejor en cada situación y por regalarme un aprendizaje nuevo cada día.

A mi papá, Gaudencio, por tu guía y enseñanza en cada etapa de mi vida. Gracias por tu apoyo y por cada momento que hemos compartido, esos instantes que han dejado en mí valiosas lecciones y recuerdos inolvidables.

A mis hermanos, Lucero y Adrián, por su compañía, por las risas compartidas y por todos los momentos inolvidables que hemos vivido. Ha sido hermoso crecer juntos, y me emociona pensar en todo lo que el futuro aún nos tiene preparado.

A mi hermana Valeria, por recordarme la magia de las pequeñas cosas y por hacerme sonreír cada vez que te veo.

A mi sobrino Owen, por la inmensa alegría que traes a nuestra familia.

Y a una de mis mejores amigas, Estela, gracias por ser una persona en la que siempre puedo confiar. La universidad nos unió, y espero que sigamos apoyándonos siempre, sin importar el camino que tomemos.

AGRADECIMIENTO

A mis asesoras de tesis la Dra. Indira Betalleluz y a la Mg. Sc. Patricia Martínez, así mismo al Dr. Luis Pérez, por su valiosa guía, experiencia y asesoramiento para la realización del presente proyecto.

Al Convenio CONCYTEC – BANCO MUNDIAL en el marco de la Convocatoria de Incorporación de Investigadores 2019 – 3° corte (Convenio N° 049-2019-FONDECYT-BM-INC.INV), por el financiamiento del presente trabajo de investigación.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN

ABSTRACT

I. INTRODUCCIÓN 1

II. REVISIÓN DE LITERATURA 4

2.1. PAPA 4

2.1.1. PAPAS NATIVAS 4

2.1.2. PAPAS AMARGAS 6

2.2. TUNTA 6

2.3. ALMIDÓN DE PAPA 10

2.3.1. GELATINIZACIÓN 11

2.3.2. RETROGRADACIÓN 12

2.3.3. EFECTO DE LA CONGELACIÓN - DESCONGELACIÓN EN LA ESTRUCTURA DEL GRÁNULO DE ALMIDÓN 13

2.4. GOMAS 14

2.5. GOMA DE TARA 17

2.6. BIOPLÁSTICOS 19

2.7. PELÍCULAS BIODEGRADABLES 21

2.7.1. MATERIA PRIMA UTILIZADA PARA LA ELABORACIÓN DE PELÍCULAS BIODEGRADABLES 23

2.7.2. PROCESOS DE OBTENCIÓN 25

2.7.3. USOS Y APLICACIONES 26

2.8. CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE PELÍCULA 28

2.8.1. PROPIEDADES FÍSICAS 28

2.8.2. PROPIEDADES MECÁNICAS 29

2.8.3. PROPIEDADES DE BARRERA 30

2.8.4. PROPIEDADES ÓPTICAS 31

2.8.5. BIODEGRADABILIDAD 31

2.8.6. PROPIEDADES ESTRUCTURALES Y MORFOLÓGICAS 33

2.9. DISEÑO DE MEZCLAS SIMPLEX 35

III. METODOLOGÍA 37
3.1. LUGAR DE EJECUCIÓN 37
3.2. MATERIA PRIMA 37
3.3. EQUIPOS, MATERIALES Y REACTIVOS 38
3.3.1. EQUIPOS 38
3.3.2. MATERIALES 38
3.3.3. REACTIVOS 39
3.4. MÉTODOS DE ANÁLISIS 39
3.4.1. PROPIEDADES FÍSICAS 39
3.4.2. PROPIEDADES ÓPTICAS 40
3.4.3. PROPIEDADES MECÁNICAS 42
3.4.4. PERMEABILIDAD AL VAPOR DE AGUA (PVA) 42
3.4.5. DESINTEGRACIÓN EN COMPOST 44
3.4.6. PROPIEDADES MORFOLÓGICAS Y ESTRUCTURALES 45
3.5. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL 45
3.6. DISEÑO EXPERIMENTAL 46
3.7. ANÁLISIS ESTADÍSTICO 49
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 50
4.1. DEFINICIÓN DE CONDICIONES ÓPTIMAS DE PROCESO PARA LAS PELÍCULAS 50
4.1.1. EFECTO DE LAS VARIABLES INDEPENDIENTES SOBRE LA FUERZA DE TRACCIÓN (FT) 56
4.1.2. EFECTO DE LAS VARIABLES INDEPENDIENTES SOBRE EL ALARGAMIENTO A LA ROTURA (AR) 59
4.1.3. EFECTO DE LAS VARIABLES INDEPENDIENTES SOBRE LA PERMEABILIDAD AL VAPOR DE AGUA (PVA) 61
4.2. OPTIMIZACIÓN Y VALIDACIÓN DE PARÁMETROS DE PREPARACIÓN DE LAS PELÍCULAS 63
4.3. CARACTERIZACIÓN DE LAS PELÍCULAS ÓPTIMAS 66
4.3.1. PROPIEDADES FISICOCOQUÍMICAS, ÓPTICAS, MECÁNICAS, DE BARRERA Y DE DESINTEGRACIÓN 66
4.3.2. PROPIEDADES MORFOLÓGICAS Y ESTRUCTURALES 80
V. CONCLUSIONES 84

VI. RECOMENDACIONES 86

VII. BIBLIOGRAFÍA 87

VIII. ANEXOS 115

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Aplicaciones de los bioplásticos..... 27

Tabla 2: Proporción (en porcentaje) de almidón: goma de tara en base a 4 g y concentración de glicerol (g/g de polímeros)..... 47

Tabla 3: Esquema experimental 48

Tabla 4: Diseño de mezclas simplex de la mezcla AP-GT con variables de proceso (no codificadas) y respuestas observadas 50

Tabla 5: Diseño simplex de la mezcla AT-GT con variables de proceso (no codificadas) y respuestas observadas..... 51

Tabla 6: Modelos predictivos sobre las propiedades mecánicas y de barrera de la mezcla AP-GT y AT-GT..... 52

Tabla 7: Resumen estadístico del análisis de varianza (ANOVA) y bondad de ajuste sobre las propiedades mecánicas y de barrera de las películas de la mezcla AP-GT..... 54

Tabla 8: Resumen estadístico del análisis de varianza (ANOVA) y bondad de ajuste sobre las propiedades mecánicas y de barrera de las películas de la mezcla AT-GT 55

Tabla 9: Restricciones para las características de la película AP:GT óptima 64

Tabla 10: Restricciones para las características de la película AT:GT óptima 64

Tabla 11: Condiciones determinadas en la optimización de la combinación de concentración de almidón y goma de tara de las películas 65

Tabla 12: Validación de condiciones óptimas de proceso para las películas comparando los valores experimentales con los predichos por los modelos para cada respuesta..... 65

Tabla 13: Caracterización parcial de las películas óptima de AP-GT y AT-GT..... 66

Tabla 14: Transmisión de luz (en porcentaje) y Transparencia ($A.mm^{-1}$) de películas óptimas……75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Flujograma del procesamiento de la tunta en Ilave, Puno 9

Figura 2: Diseño estructural básico de (a) unidades de glucosa, (b) amilosa y (c) amilopectina……..11

Figura 3: Representación de un segmento de molécula de galactomanano 16

Figura 4: Unidades de repetición teóricas de cuatro galactomananos diferentes 16

Figura 5: Goma de tara en forma de: (a) vainas, (b) semillas y (c) polvo 17

Figura 6: Estructura de la goma de tara formada por manosa y galactosa 18

Figura 7: Clasificación de los bioplásticos 20

Figura 8: Producción mundial de bioplásticos en 2021 (por segmento de mercado)..... 21

Figura 9: Proceso de elaboración de películas mediante el método casting: (1) Suspensión formadora de película y gelatinización. (2) Casting de la solución formadora de película en la plataforma nivelada (SFP). (3) Enfriamiento y secado. (4) Despegado de las películas secas de la plataforma 26

Figura 10: Curva típica de deformación por tracción en películas de biopolímeros 29

Figura 11: Etapas de la biodegradación..... 32

Figura 12: Espectro infrarrojo típico con transformada de Fourier de membrana de celulosa regenerada con los diversos enlaces que absorben las regiones aproximadas 34

Figura 13: Un simplex para una mezcla ternaria. Las líneas punteadas indican intervalos del 10 por ciento de los componentes..... 36

Figura 14: Películas desarrolladas en mezclas de almidón de papa-goma de tara y almidón de tunta-goma de tara en diferentes proporciones 56

Figura 15: Interacción del AP y GT en la fuerza de tracción 57

Figura 16: Interacción del AT y GT en la fuerza de tracción..... 57

Figura 17: Interacción de la mezcla AP-GT en el alargamiento a la rotura 60

Figura 18: Interacción de la mezcla AT-GT en el alargamiento a la rotura 60

Figura 19: Interacción de la mezcla AP-GT en la PVA 62

Figura 20: Interacción de la mezcla AT-GT en la PVA 62

Figura 21: Películas óptimas desarrolladas para las mezclas de almidón de papa-goma de tara y almidón de tunta-goma de tara 71

Figura 22: Transmitancia en las mezclas óptimas de AP-GT y AT-GT 75

Figura 23: Espectros FTIR para películas optimizadas de AP-GT y AT-GT 81

Figura 24: Micrografía de la sección superficial de (a) mezcla óptima de AP-GT a 1000 x y (b) mezcla óptima de AT-GT a 1000 x..... 83

Figura 25: Micrografía de la sección transversal de (a) mezcla óptima de AP-GT a 1500x y (b) mezcla óptima de AT-GT a 2000x..... 83

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1: IMÁGENES DE LA MATERIA PRIMA 115

ANEXO 2: SOLUCIONES ENCONTRADAS PARA LA OPTIMIZACIÓN NUMÉRICA DE LA MEZCLA DE ALMIDÓN – GOMA DE TARA 116

ANEXO 3: ANOVA Y TUKEY PARA PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS 117

ANEXO 4: ANOVA Y TUKEY PARA LAS PROPIEDADES ÓPTICAS 121

ANEXO 5: ANOVA Y TUKEY PARA LAS PROPIEDADES MECÁNICAS 126

ANEXO 6: ANOVA Y TUKEY PARA LAS PROPIEDADES BARRERA-PERMEABILIDAD AL VAPOR DE AGUA (PVA) 128

ANEXO 7: ANOVA Y TUKEY PARA DESINTEGRACIÓN EN COMPOST 129

RESUMEN

El presente trabajo de investigación tuvo como objetivo elaborar y caracterizar películas biodegradables a base de almidón de papa (AP) o almidón de tunta (AT) de la variedad nativa Ocucuri negra y goma de tara (GT). La tunta es un producto deshidratado que se obtiene a partir de los tubérculos de papa mediante un proceso tradicional y artesanal que se basa en un congelado-secado natural. Se realizó un diseño de mezclas simplex utilizando la solución formadora de película (SFP) en una proporción de almidón: goma de tara de 100:0, 97.5:2.5, 95:5, 92.5:7.5 y 90:10 (4 g de biopolímeros/100 g de SFP) y glicerol como plastificante. Con el fin de determinar los modelos predictivos para las tres variables respuestas evaluadas: fuerza de tracción (FT), alargamiento a la rotura (AR) y permeabilidad al vapor de agua (PVA), se realizó un análisis de regresión múltiple donde se observó que la goma de tara tuvo un efecto positivo en la FT y PVA de las películas mezcla de AT-GT; y en el AR de la mezcla AP-GT. Para la determinación de la formulación óptima se realizó una optimización simultánea en base a las tres variables respuesta anteriormente descritas, y teniendo como objetivo maximizar la fuerza de tracción (FT), mantener en un rango aceptable el alargamiento a la rotura (AR) y minimizar la permeabilidad al vapor de agua (PVA). En función a estas condiciones para las variables respuesta, la formulación óptima para la mezcla AP-GT fue la proporción 100:0 y para la mezcla AT-GT, fue 90:10. Posteriormente, se realizó la caracterización de las formulaciones óptimas en base a sus propiedades físicas, mecánicas, morfológicas y estructurales obteniéndose resultados en la formulación óptima de AP-GT y de AT-GT de: 17.71 ± 0.19% y 18.32 ± 0.10% (para la humedad), 30.93 ± 1.73% y 23.42 ± 0.54% (para la solubilidad en agua), 438.93 ± 13.68% y 344.70 ± 21.46% (para el grado de hinchamiento), 96.42 ± 0.11 y 96.38 ± 0.11 (para el parámetro de color L*), 0.22 ± 0.01 y 0.21 ± 0.01 (para a*), 2.83 ± 0.03 y 2.85 ± 0.03 (para b*), 0.70 ± 0.07 y 0.77 ± 0.07 (para ΔE^*), 4.19 ± 0.05 y 4.23 ± 0.05 (para el índice de amarillez), 95.43 ± 0.10 y 95.38 ± 0.10 (para el índice de blancura), 1.78 ± 0.06 $A.mm^{-1}$ y 1.96 ± 0.13 $A.mm^{-1}$ (para la transparencia), 5.02 ± 0.46 MPa y 10.65 ± 0.68 MPa (para la FT), 15.38 ± 1.12% y 11.52 ± 0.68% (para el AR), 7.26 ± 0.38 $x10^{-11}$ $gm^{-1}s^{-1}$ Pa^{-1} y 6.14 ± 0.64 $x10^{-11}$ $gm^{-1}s^{-1}$ Pa^{-1} (para la PVA) y 59.31 ± 2.84% y 69.07 ± 2.32% (desintegración en compost a los cinco días), respectivamente. Los espectros FTIR mostraron en las películas óptimas una banda ancha característica del grupo O-H polimérico en 3000-3600 cm^{-1}. Las micrografías SEM de la superficie y la morfología de la sección transversal mostraron una superficie ligeramente

rugosa sin ninguna grieta o poros y una fase homogénea y continua, lo que sugiere una buena compatibilidad y capacidad de formación de películas entre esos biopolímeros. En conclusión, los resultados obtenidos confirmaron que las películas óptimas de AP-GT y AT-GT elaboradas presentan propiedades fisicoquímicas apropiadas junto con unas fuertes propiedades mecánicas y de barrera al vapor de agua, lo que nos señala su potencial uso como material de empacado biodegradable para la conservación de alimentos.

Palabras clave: Películas biodegradables, almidón de papa y tunta, goma de tara, diseño de mezclas, caracterización.

ABSTRACT

The objective of this research work was to elaborate and characterize biodegradable films based on potato starch (AP) or tunta starch (AT) of the native variety Ocucuri negra and tara gum (GT). Tunta is a dehydrated product obtained from potato tubers through a traditional and artisanal process based on natural freeze-drying. A simplex mixture design was performed using film forming solution (SFP) in a starch: tara gum ratio of 100:0, 97.5:2.5, 95:5, 92.5:7.5 and 90:10 (4 g biopolymers/100 g SFP) and glycerol as plasticizer. To determine the predictive models for the three response variables evaluated: tensile strength (FT), elongation at break (AR) and water vapor permeability (PVA), a multiple regression analysis was performed where it was observed that tara gum had a positive effect on the FT and PVA of the AT-GT blend films; and on the AR of the AP-GT blend. To determine the optimal formulation, a simultaneous optimization based on the three previously described response variables was conducted, aiming to maximize the tensile strength (FT), maintain an acceptable range for the elongation at break (AR), and minimize the water vapor permeability (PVA) Based on these conditions for the response variables, the optimum formulation for the AP-GT mixture was the ratio 100:0 and for the AT-GT mixture, it was 90:10. Subsequently, the optimal formulations were characterized based on their physical, mechanical, morphological, and structural properties, obtaining results for the optimal formulation of AP-GT and AT-GT of 17.71 ± 0.19% and 18.32 ± 0.10% (for moisture), 30.93 ± 1.73% and 23.42 ± 0.54% (for water solubility), 438.93 ± 13.68% and 344.70 ± 21.46% (for swelling degree), 96.42 ± 0.11 and 96.38 ± 0.11 (for L^*), 0.22 ± 0.01 and 0.21 ± 0.01 (for a^*), 2.83 ± 0. 03 and 2.85 ± 0.03 (for b^*), 0.70 ± 0.07 and 0.77 ± 0.07 (for ΔE^*), 4.19 ± 0.05 and 4.23 ± 0.05 (for yellowness index), 95.43 ± 0.10 and 95.38 ± 0.10 (for whiteness index), 1.78 ± 0.06 $A.mm^{-1}$ and 1.96 ± 0.13 $A.mm^{-1}$ (for transparency), 5.02 ± 0.46 MPa and 10.65 ± 0.68 MPa (for FT), 15.38 ± 1.12% and 11.52 ± 0.68% (for AR), 7.26 ± 0.38 $x10^{-11}$ $gm^{-1}s^{-1}$ Pa^{-1} and 6.14 ± 0.64 $x10^{-11}$ $gm^{-1}s^{-1}$ Pa^{-1} (for PVA) and 59.31 ± 2.84% and 69.07 ± 2.32% (composting disintegration at five days), respectively. FTIR spectra showed in the optimum films a broad band characteristic of the polymeric O-H group at 3000-3600 cm^{-1}. SEM micrographs of the surface and cross-sectional morphology showed a slightly rough surface without any cracks or pores and a homogeneous and continuous phase, suggesting good compatibility and film-forming ability between these biopolymers. In conclusion, the obtained results confirmed that the optimal AP-GT and AT-GT films

exhibit appropriate physicochemical properties along with strong mechanical and water vapor barrier properties, which points to their potential use as a biodegradable packaging material for food preservation.

Keywords: Biodegradable films, potato and tunta starch, tara gum, blend design, characterization.

I. INTRODUCCIÓN

La creciente producción y uso del plástico tiene un gigantesco impacto en la contaminación ambiental y el cambio climático. Los plásticos obtenidos a partir de recursos fósiles generalmente son materiales que requieren cientos de años para su degradación en componentes básicos (metano, etileno, entre otros) después de uso final, generando así problemas de contaminación ambiental y contribuyendo con el cambio climático (Meritaine da Rocha et al., 2018; Royer et al., 2018). La Industria Alimentaria es responsable de una gran cantidad del plástico anualmente producido, siendo su uso principalmente en el empacado de alimentos (Dhall & Alam, 2019). Así mismo, los consumidores de alimentos que cada vez son más exigentes y conscientes del impacto ambiental de los plásticos sintéticos encontrarán materiales alternativos a ser utilizados, satisfaciendo así sus necesidades y expectativas por materiales más amigables con el medio ambiente (Rydz et al., 2018).

El desarrollo de películas biodegradables representa una alternativa ante el uso de envases no biodegradables, donde el almidón es uno de los polímeros más ampliamente estudiados debido a su alta disponibilidad, renovabilidad y principalmente debido a su bajo costo (Moreno et al., 2015).

Las papas nativas son tubérculos cultivados extensamente por diversos productores y comunidades agrícolas en el Perú, se distinguen por sus texturas, formas y colores únicos; siendo el Perú, el país que posee la mayor biodiversidad de papas en el mundo. Se han llevado a cabo diversos estudios de las características del almidón de papa y almidón de tunta de papas nativas, revelando propiedades fisicoquímicas y funcionales de considerable interés (Cuba, 2021; Martínez et al., 2022; Peña, 2017).

En la presente investigación se busca emplear la variedad de papa y tunta nativa Ocucuri negra como una fuente de almidón para la elaboración de películas. Este enfoque podría

roporcionar a esta variedad de papa una alternativa de uso diferente a su destino tradicional, que es la producción de tunta.

Por otro lado, el uso del almidón en películas es limitado debido a sus débiles propiedades de barrera al vapor de agua, su comportamiento hidrófilo y menores propiedades mecánicas en comparación a materiales basados en polímeros sintéticos (Meritaine da Rocha et al., 2018). Debido a estas razones, investigaciones recientes han evaluado el efecto de la incorporación de otros polímeros a la matriz del almidón con el objetivo de mejorar las propiedades fisicoquímicas de las películas (Jiménez et al., 2012a). Las películas compuestas de biopolímeros pueden aportar mejoras a las propiedades mecánicas y físicas si los componentes son estructuralmente compatibles (Saberi et al., 2016), por lo que, la mezcla de almidón con otros hidrocoloides puede producir películas con propiedades interesantes y con potencial para nuevas aplicaciones.

Las gomas o galactomananos naturales han sido aplicados en el desarrollo de películas debido a su naturaleza comestible y su biodegradabilidad (Antoniou et al., 2014; Bourbon et al., 2011). Entre los galactomananos se puede encontrar a la goma de tara, que es un polisacárido procedente del endospermo molido de la semilla del árbol *Caesalpinia spinosa,* originario de Perú y ampliamente cultivado en muchos países (Wu et al., 2015). Ha sido aprobada como aditivo alimentario debido a su no toxicidad y es utilizada como agente espesante y estabilizante (Mortensen et al., 2017). Existen muy pocas investigaciones del uso de goma de tara en el desarrollo de películas biodegradables (Antoniou et al., 2014; Ma et al., 2016; Nuvoli et al., 2021).

Por estos motivos, la presente investigación tuvo como objetivo: elaborar y caracterizar películas biodegradables a partir del almidón de papa y tunta de la variedad de papa nativa Ocucuri negra y goma de tara.

A continuación, se presentan los siguientes objetivos específicos:

- Evaluar el efecto del almidón de papa o tunta de la variedad nativa Ocucuri negra y de la goma de tara en las propiedades mecánicas y de barrera de películas de la mezcla de estos dos biopolímeros.

- Determinar la proporción óptima de almidón de papa o tunta de Ocucuri negra y goma de tara en la formulación de la película mediante la metodología de superficie de respuesta. Las variables respuesta evaluadas fueron las propiedades mecánicas, representadas por la fuerza de tracción (FT) y el alargamiento a la rotura (AR), así como las propiedades de barrera, siendo la permeabilidad al vapor de agua (PVA).

- Elaborar películas biodegradables a través del método Casting, utilizando la mezcla almidón de papa o tunta de Ocucuri negra y goma de tara utilizando las formulaciones óptimas identificadas.

- Determinar las propiedades fisicoquímicas (humedad, solubilidad en agua, grado de hinchamiento), propiedades ópticas (color, transmisión de luz y transparencia), propiedades mecánicas (alargamiento a la rotura (AR) y fuerza de tracción (FT)), propiedades de barrera (permeabilidad al vapor de agua (PVA)), desintegración, morfológicas (FTIR) y estructurales (SEM) de las películas óptimas desarrolladas.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. PAPA

La papa es uno de los alimentos más importante del mundo, según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), tanta es la importancia de este tubérculo que es el cuarto alimento más cultivado en el planeta, detrás del maíz, el trigo y el arroz. Dentro de la producción mundial de papa, el Perú ocupa la posición 14ª (8ª por superficie sembrada y 122ª por rendimiento) y es el primer productor de América Latina (Buse et al., 2021).

En la economía peruana, la papa es el segundo cultivo de mayor importancia, siendo su nivel de participación en el valor bruto de producción del subsector agrícola del 10.7%, siendo solo superada por el de arroz (11.5%) (Sierra y Selva Exportadora, 2020). La papa se cultiva en la gran mayoría de pisos ecológicos (con altitudes de hasta 4000 m.s.n.m.), en suelo profundo, orgánico, bajo una humedad menor a 75%, en clima templado-frío, siendo las temperaturas más favorables para este cultivo entre 13 y 18 °C (Proexpansión, 2011).

Actualmente, 19 de los 24 departamentos del país son productores de papa, siendo la región con mayor participación en la producción total nacional, el departamento de Puno (16.9% en el año 2021). Hay otros departamentos como Huánuco (14.0%), La Libertad (10.5%) y Cusco (7.7%), que son productoras de importantes volúmenes de papa (SIEA- Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego, 2022).

2.1.1. PAPAS NATIVAS

Las papas nativas son aquellas variedades de papa que han sido domesticadas por los antiguos peruanos (Gómez et al., 2008), han sido seleccionadas a través de los siglos por sus texturas, formas y colores, y están muy bien adaptadas a las condiciones extremas de las

alturas andinas de entre 3500 a 4200 m.s.n.m. Se cultivan más de 4000 variedades de papas nativas en las altiplanicies andinas de Perú, Bolivia y Ecuador (International Potato Center, 2022).

El Perú cuenta con la más amplia biodiversidad de papa en el mundo. El Banco de Germoplasma del Centro Internacional de la Papa (CIP) conserva 4355 variedades tradicionales o nativas de la Región Andina; de las cuales 2694 (62%), son del Perú. Las papas nativas destacan por su diversidad de formas, tamaños, colores de la cáscara y de la pulpa, sabores y texturas. Las pulpas son blancas, amarillas, rojas, azules, naranjas y moradas y en muchos casos forman combinaciones vistosas y únicas (International Potato Center, 2017).

De acuerdo con Peña (2017), la diversidad de las papas nativas tiene un desarrollo desigual con marcadas diferencias regionales. Solo algunas variedades son conocidas a nivel nacional cuyo consumo es difundido. Otras solo tienen presencia regional, mientras que la mayoría de ellas son desconocidas y corren riesgo de erosión. La conservación de papas nativas in situ (en los campos de los agricultores) y ex situ (en bancos de germoplasma) cuenta con el apoyo de instituciones de investigación y desarrollo como el CIP (Devaux et al., 2021).

La producción y comercialización de papas presenta una notable diversidad, caracterizándose por particularidades que varían en función de las distintas variedades cultivadas. Se pueden identificar tres segmentos principales: papas blancas, papas amarillas y papas nativas (Ordinola et al., 2009).

Las papas nativas poseen un gran potencial para el desarrollo y posicionamiento comercial. En el sector gastronómico, estas variedades son ingredientes fundamentales para algunas de las cocinas más influyentes a nivel mundial. Desde la elaboración de chips de colores hasta la creación de vegetales “delicatessen” e incluso en la producción licores, las papas nativas están experimentando un creciente interés para la innovación de nuevos productos (Devaux et al., 2021).

2.1.2. PAPAS AMARGAS

Las especies de papa son divididas en dos grandes grupos, las papas amargas y las papas dulces. La diferencia entre estos dos grupos es el nivel de glicoalcaloides, donde las papas amargas presentan un alto contenido de glicoalcaloides (mayores de 20 mg/100g de peso fresco), lo que le confiere un sabor amargo y desagradable (Cahuana & Arcos, 2002). Es por ello por lo que, para ser consumidas estas papas deben pasar por procesos de transformación donde se debe disminuir este alto contenido de glicoalcaloides, obteniéndose chuño negro mediante un proceso de deshidratado por efecto alternado de congelación y secado; o produciendo moraya o tunta por procesos de congelación, lavado y secado (Cahuana & Arcos, 2002; Peña, 2017).

La papa amarga presenta ventajas comparativas por su alta tolerancia a bajas temperaturas (menores a –5ºC) y resistencia prolongada a periodos de deficiencia hídrica (sequías), lo que permite que el cultivo posee tolerancias elevadas a las condiciones climáticas adversas del Altiplano (Canqui & Morales, 2009).

El departamento de Puno es el principal productor de chuño negro y tunta con aproximadamente el 80% de la producción nacional, donde el distrito de Ilave (en las localidades de Huaycho, Wilamaya, Yunguta), de la provincia del Collao es la zona de mayor producción de chuño negro y representa el 50% de la producción departamental (Cardenas, 2018; Salazar et al., 2008).

2.2. TUNTA

En la NTP 011.400:2019 se define que la tunta es el alimento elaborado mediante un proceso de deshidratación de tubérculos a través de sucesivos congelamientos (con protección solar), sumergido en agua corriente (río) y secado al sol (Instituto Nacional de Calidad, 2019).

Posee características particulares, siendo estas: tubérculo entero, deshidratado y de color blanco, motivo por el cual también es conocido como chuño blanco. Asimismo, es importante resaltar que este producto es obtenido mediante tecnología artesanal.

Anteriormente, solo se utilizaban las papas amargas para la elaboración de tunta, siendo las variedades más conocidas la *Locka o Lucki, Palitam Piñaz,* aunque actualmente, las papas dulces también son utilizadas para su elaboración (Fonseca et al., 2008).

Los dos motivos principales de la producción de tunta son el factor consumo y la seguridad alimentaria, donde el primer motivo es explicado debido a que las papas amargas (por su alto contenido de alcaloides) no pueden ser consumido de forma frescas. Y con respecto a la seguridad alimentaria, este procesamiento en la papa permite el almacenamiento de la papa durante tiempos más prolongados (Fonseca & Ordinola, 2011).

Este producto es muy apreciado en la Sierra Sur de Perú (Puno, Cusco, Arequipa y Tacna) y en Bolivia, siendo el 70% de la producción nacional representado por Puno, según expertos en el sector tunta (Fonseca & Ordinola, 2011).

A continuación, se detalla las etapas necesarias para la transformación de los tubérculos de papa fresca en tunta (Fonseca et al., 2008), las cuales se observan en la Figura 1.

- Recepción: Las papas almacenadas en sacos de polipropileno o envases bien lavados son recepcionadas, registrándose el peso inicial.

- Selección y clasificación: Se realiza sobre un piso de mallas y/o mantas plásticas. Se clasifica la papa de acuerdo con el tamaño (grande, mediano y chico), y a la con el objetivo de lograr un mejor efecto de la helada y uniformidad en el congelado. La selección es según su sanidad, separando las papas sanas de las dañadas (partida, agusanada, podrida, ciega, entre otros).

- Primer congelado: Las papas se exponen a las temperaturas propias del invierno de Puno (inferiores a 5°C) durante tres o cuatro noches. Los tubérculos de papa deben ser dispersados uniformemente en una sola capa. Se realiza el recojo del producto durante los cuatro días, antes de la salida del sol y se cubre con mantas gruesas hasta la puesta del sol. Este proceso finaliza cuando al chocar los tubérculos entre sí, suenan como piedras.

- Inmersión en agua: Se sumergen las papas congeladas en el río por un periodo de entre 21 a 30 días, según la variedad de papa. Para ello, se instalan en el río pozas o jaulas con mallas que puedan resistir aproximadamente de una a tres toneladas.

- Segundo congelado: Se congela los tubérculos de papa remojados por una noche, extendidos sobre una capa de paja limpia y mallas, las cuales favorezcan el escurrimiento, oreado y descascarado.

- Descascarado y lavado: Se coloca los tubérculos de papa congelados en una manta de malla de nombre "taquiña", se procede al descascarillado mediante el apisonado con botas de jebe limpias y desinfectadas. Se enjuagan en el río repetidas veces hasta que el agua de enjuague salga transparente, el último enjuague se realiza con agua clorada (una cucharada de lejía para una tina de 7 a 10 litros).

- Secado: Se extiende la tunta húmeda sobre mallas o mantas desinfectadas de manera uniforme durante siete días aproximadamente. En las noches con neblina se cubren con mantas, para evitar el amarillamiento.

- Rozado y venteo: Se coloca una arroba de tunta en una manta de malla, balanceándose de un lado a otro, para provocar el roce entre las tuntas, logrando el pelado final. Inmediatamente después, se procede al venteo para separar completamente los restos de cáscara.

- Selección y envasado: Se realiza la selección de acuerdo con el tamaño, color y grietas en la tunta. Dependiendo de la categoría dependerá el precio y el destino comercial del producto. Para el envasado, la tunta se coloca en sacos de polipropileno, siendo etiquetados con información básica como variedad, categoría, peso y fecha de envasado.

- Almacenamiento: La tunta por lo general se almacena dentro de las viviendas de los productores, en un ambiente cerrado, con techo y paredes fáciles de limpiar. Las ventanas son selladas con mallas para evitar el ingreso de vectores. Los sacos son apilados entre

sí (como máximo en cinco unidades por pila) y deben permanecer en el almacén como máximo un año.

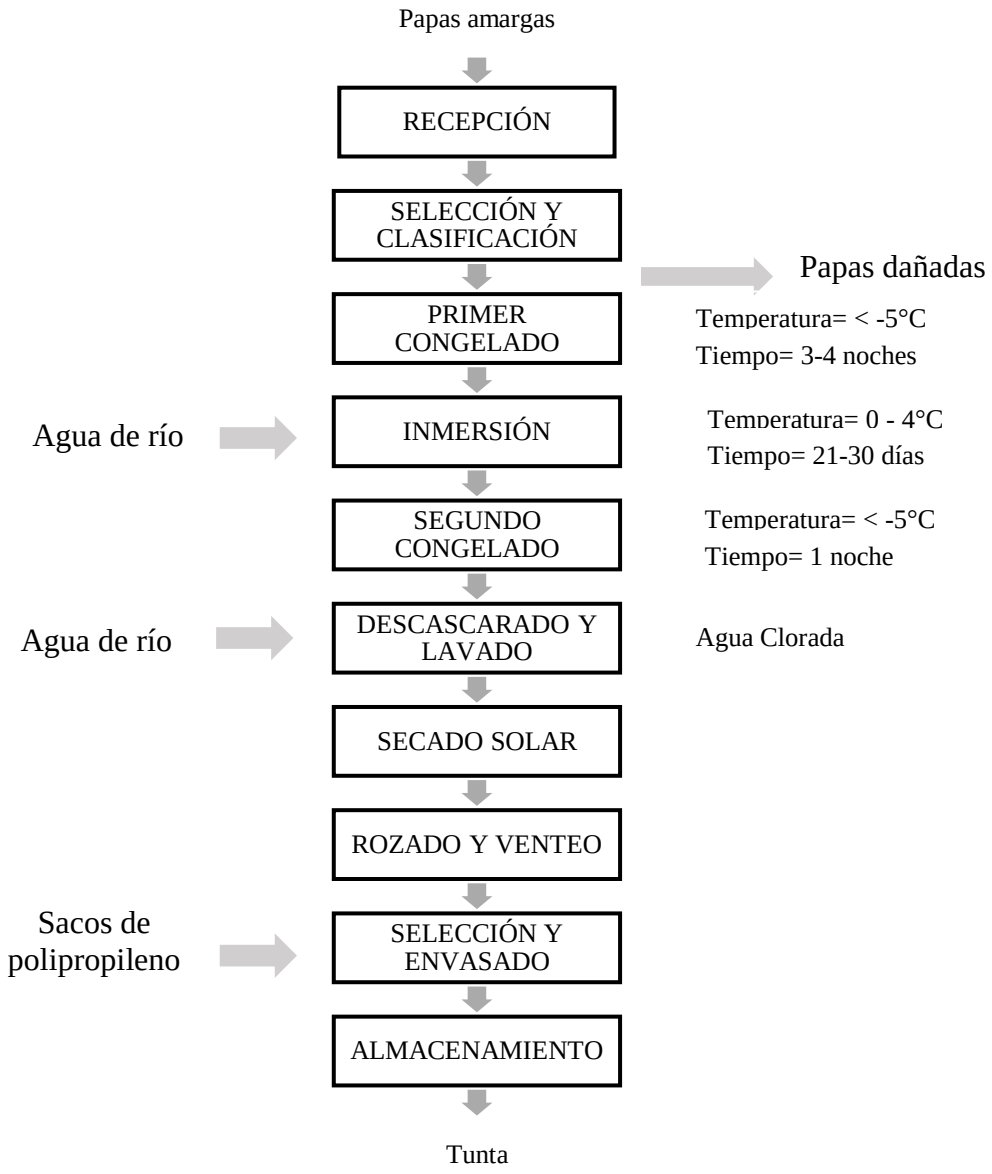


Figura 1: **Flujograma del procesamiento de la tunta en Ilave, Puno**

FUENTE: Cuba (2020); Fonseca & Ordinola (2011)

2.3. ALMIDÓN DE PAPA

El almidón es el polisacárido de reserva de la mayoría de las plantas y se encuentra ampliamente distribuido en diversas fuentes botánicas como cebada, trigo, arroz, papa, maíz, entre otros. Es un recurso renovable que se encuentra ampliamente disponible y puede ser obtenido diversas fuentes como residuos de cosecha o la industrialización de materias primas (Kumar et al., 2020; Meritaine da Rocha et al., 2018).

Se organiza en gránulos cuyo tamaño, forma, morfología, composición y estructura supramolecular dependen de la fuente botánica (Singh et al., 2003). El almidón es un polímero semicristalino compuesto de una mezcla de dos macromoléculas, amilosa y amilopectina (Figura 2). La amilosa es una macromolécula esencialmente lineal que consta de monómeros de D-glucopiranosil unidos mediante enlaces α-1,4, y la amilopectina es una macromolécula ramificada que consta de cadenas cortas de unidades de glucosa conectadas por enlaces α-1,4 y ramificaciones mediante enlaces α-1,6 (Funami et al., 2005).

En la Figura 2 se muestra las unidades estructurales del almidón, amilosa y amilopectina. Las cadenas doble hélice se forman debido a la distribución polimodal de las cadenas α-glucanos de diferentes tamaños y la agrupación de puntos de ramificación en la molécula de amilopectina. La amilosa y la amilopectina se organizan en una estructura semicristalina formando una matriz de gránulos de almidón con material amorfo (amilosa) y cristalino (amilopectina) alternado (Jenkins et al., 1993 citado por Alcázar-Alay & Meireles, 2015).

La relación amilosa: amilopectina depende de la fuente de almidón y oscila entre 15:85 y 35:65. En las variedades de almidón ceroso el contenido de amilosa es de alrededor del 5% y en el caso del almidón de maíz con alto contenido de amilosa, del 50% al 85% (Cano et al., 2014; Gennadios, 2004).

Las propiedades del almidón dependen del tamaño de los gránulos, la distribución, la relación amilosa/amilopectina, el contenido mineral y el contenido de ésteres de fosfato de almidón (Kaur et al., 2007; Zhou et al., 2014). Asimismo, la proporción de los dos α-glucanos (amilosa y amilopectina) en los gránulos de almidón, así como su estructura

molecular influyen en las propiedades de solubilidad, la temperatura de gelatinización, viscosidad, gelificación y retrogradación del almidón (Blazek y Copeland, 2008 citados por Schirmer et al., 2013).

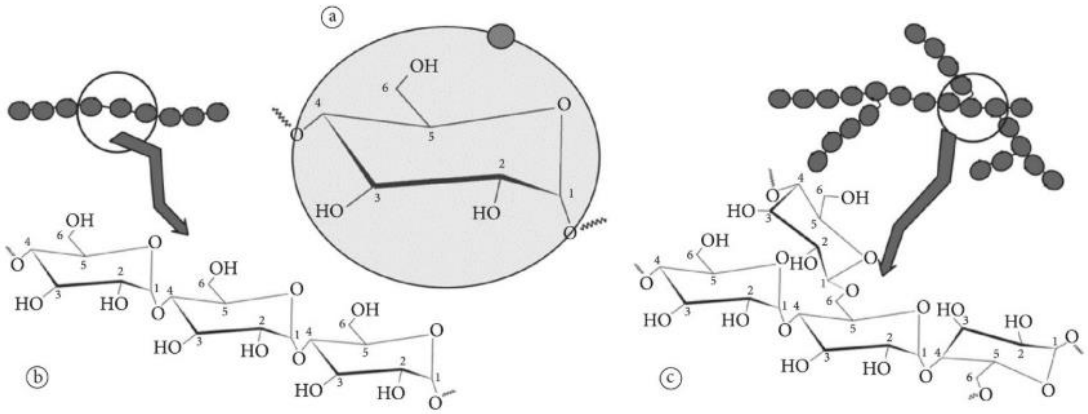


Figura 2: Diseño estructural básico de (a) unidades de glucosa, (b) amilosa y (c) amilopectina

FUENTE: Pérez & Bertoft (2010) modificado por Alcázar-Alay & Meireles (2015)

El fósforo es uno de los componentes no carbohidratos presentes en el gránulo de almidón, está presente como fosfatos de monoéster o fosfolípidos en varios tipos de almidones. Los fosfatos de monoéster se asocian con la fracción de amilopectina por enlaces covalentes y el contenido de fosfolípidos en los gránulos de almidón está proporcionalmente relacionado con la amilosa. Los fosfolípidos tienden a formar complejos con amilosa y ramificaciones largas de amilopectina, lo que da como resultado gránulos de almidón con solubilidad limitada (Singh et al., 2003).

2.3.1. GELATINIZACIÓN

A continuación, se describe las etapas del proceso de gelatinización del gránulo de almidón (Funami et al., 2005; Jiménez et al., 2012b; Vaclavick, 2002).

Los gránulos de almidón no son solubles en agua en su estado nativo debido a los fuertes enlaces de hidrógeno que tienen las cadenas del polímero. Sin embargo, cuando el almidón se calienta en agua, se produce la imbibición o incorporación del agua en el gránulo. La energía cinética de las moléculas de agua caliente rompe los puentes de hidrógeno entre las moléculas de almidón. A medida que se forman puentes de hidrógeno, el agua es capaz de penetrar más profundamente en el gránulo de almidón y tiene lugar el hinchamiento. Debe estar presente suficiente cantidad de agua para entrar y agrandar el gránulo de almidón. Esta incorporación ocurre más rápidamente en las regiones amorfas, y posteriormente, en las regiones más cristalinas de la molécula de almidón, esto debido a las asociaciones más débiles entre las moléculas, pero también a la fusión de la red cristalina dentro de los gránulos al romper los enlaces de hidrógeno. Esta interacción entre los grupos hidroxilo de la amilosa y la amilopectina con las moléculas de agua produce la solubilización parcial del almidón. Esta etapa en el proceso de gelatinización es reversible.

Conforme el calentamiento continúa, los gránulos de almidón captan agua de forma irreversible y se hinchan, lo que da como resultado la lixiviación de la amilosa fuera de los gránulos y la separación irreversible de fases en regiones ricas en polímeros y regiones deficientes en polímeros.

La gelatinización es un proceso endotérmico donde ocurre un colapso o interrupción del orden molecular del gránulo de almidón que se evidencia por cambios irreversibles como la hinchazón granular, la pérdida de la estructura cristalina y ordenada del almidón, la pérdida de la birrefringencia y la solubilización del almidón (Vaclavick, 2002). En resumen, la gelatinización implica dos etapas, la hidratación y la difusión del disolvente en los gránulos de almidón y la fusión de los cristales de almidón. Este proceso se ve afectado por las altas temperaturas, el tipo de disolvente y la proporción de almidón/disolvente (Jiménez et al., 2012a).

2.3.2. RETROGRADACIÓN

Durante el almacenamiento del sistema acuoso de almidón después de la gelatinización, las moléculas de amilosa y amilopectina se reorganizan y aumenta la rigidez. Este proceso de retrogradación ocurre en dos etapas, siendo la primera etapa, la gelificación a corto plazo de

la amilosa dentro de la fase continua que se realiza dentro de las primeras horas; y la segunda etapa, la cristalización a largo plazo de la amilopectina que es mucho más lenta (Funami et al., 2005; Vázquez et al., 2011).

A nivel molecular, las cadenas de amilosa lixiviadas se asocian mediante puentes de hidrógeno, formando una red tridimensional donde los gránulos quedan hinchados, y dentro de estos, la amilopectina se recristaliza en un arreglo que depende del tipo de almidón y la temperatura a la que se almacenan los productos (Charro, 2015). La retrogradación del almidón conlleva cambios como el aumento de la viscosidad, desarrollo de opacidad y turbidez del gel, precipitación de partículas almidón insolubles, formación de geles y sinéresis de agua de la pasta (Shrestha & Halley, 2014).

El proceso de retrogradación se ve influenciado por el tipo de almidón y está relacionado principalmente con su contenido de amilosa, debido a que la amilopectina está más limitada, ya que por sus ramificaciones la formación de puentes de hidrógenos se ve impedida entre cadenas adyacentes. Las fracciones de amilosa o las secciones lineales de amilopectina que retrogradan forman zonas con una organización cristalina muy rígida que requiere de una alta energía para que el almidón gelatinice (Charro, 2015).

2.3.3. EFECTO DE LA CONGELACIÓN - DESCONGELACIÓN EN LA ESTRUCTURA DEL GRÁNULO DE ALMIDÓN

El congelamiento-descongelamiento es reconocido como uno de los métodos físicos más importante para la modificación del almidón. El efecto de este tratamiento depende de factores como la variedad de almidón, temperaturas de congelación y descongelación, contenido de humedad, ciclos de congelación-descongelación y velocidad de congelación. Este proceso de múltiple congelación y descongelación puede aumentar el área superficial específica de los gránulos y el tamaño de su poro; así como su capacidad de absorción y la digestibilidad del almidón procesado (Yu et al., 2015). Es debido a este motivo que, este método tiene un gran potencial en la producción de almidones porosos, que presenta excelentes propiedades absorbentes y puede ser utilizado como portadores de edulcorantes, saborizantes, colorantes y de protección de elementos sensibles (minerales, vitaminas, fenoles, probióticos, entre otros) (Wu & Zhou, 2018).

2.4. **GOMAS**

El término "goma" se utiliza para describir un grupo de polisacáridos de origen natural que tienen amplias aplicaciones industriales debido a su capacidad de modificar la reología de sistemas acuosos (Wielinga, 2009). Las gomas solubles en agua conocidas como “hidrocoloides” se utilizan en diversas aplicaciones como fibra dietética, modificadores de textura, agentes gelificantes, espesantes, estabilizadores y emulsionantes, agentes de recubrimiento y en películas de envasado (BeMiller, 2019b).

Las gomas naturales pueden clasificarse de acuerdo con su origen, comportamiento y estructura química (Mirhosseini & Amid, 2012) y se encuentran en diversas fuentes de la naturaleza como:

1. Exudados de ciertos árboles o arbustos, esto ocurre cuando la corteza de estos es herida por insectos o por golpes manuales, y con el fin de sellar la herida y dar protección contra la infección y la desecación se produce el exudado (dentro de las gomas exudadas podemos encontrar goma arábiga o acacia, goma karaya y la goma ghatti que son exudados de árboles y la goma tragacanto es un exudado de arbustos) (Phillips & Phillips, 2011).

2. Elementos estructurales (revestimientos protectores) producidos por microorganismos con el fin de alejar a los organismos invasores y/o para evitar la pérdida excesiva de humedad en condiciones de desecación (dentro de estas gomas podemos encontrar a la goma xantana, producida por la bacteria *Xanthomonas campestris* y a la goma gellan, producida por *Sphingomonas elodea*) (BeMiller, 2019c, 2019a).

3. Algas rojas (de las cuales se extraen carragenaninas, como k-carragenaninas o agar) y algas pardas (alginatos).

4. Tubérculos de plantas (como la goma konjac, obtenidas de la harina de los tubérculos de *Amorphophallus konjac* K. Koch).

5. Semillas de algunas leguminosas (goma guar, goma de garrofin, entre otros) (BeMiller, 2019b).

6. Fuentes animales (quitina).

Las gomas son polímeros de hidratos de carbono de alto peso molecular cuyos polisacáridos principales son los galactomananos. Los galactomananos son carbohidratos de reserva de varias semillas que almacenan energía para la germinación del endospermo, existen cuatro fuentes principales de galactomananos de semillas: el árbol de algarrobo (*Ceratonia siliqua*), la planta guar (*Cyamopsis tetragonoloba*), los granos del arbusto de tara (*Caesalpinia spinosa Kuntze*) y la planta de fenogreco (*Trigonella foenum graecum L.*) (Biliaderis & Izydorczyk, 2007). Las gomas de semillas son obtenidas mediante una molienda del endospermo, por lo que pueden ser consideradas "harinas". Las semillas del árbol de algarrobo y de la planta guar son las más utilizadas para la obtención de gomas de semillas, mientras que los granos de tara y fenogreco son utilizados en menor medida (Wielinga, 2009).

Los galactomananos de semillas o gomas de semillas están compuestos de polisacáridos heterogéneos de residuos de galactopiranosil y manopiranosil, están constituidos por una cadena principal de unidades de β-D-manopiranosilo unidas por enlaces 1→4 con unidades de manopiranosilo que llevan unidades individuales de α-D-galactopiranosilo unidas a O6 (Figura 3 y Figura 4) (BeMiller, 2019b; Srivastava & Kapoor, 2005). Estos galactomananos presentan una relación de manosa: galactosa entre 1.1:1 y 3.5:1, pudiendo ser distinguidos entre sí debido a su relación característica. Esta relación suele estar en el rango de 1.0-1.1:1; 1.6-1.8:1; 3:1; 3.9-4.0:1 para las gomas de fenogreco, guar, tara y algarrobo, respectivamente (Biliaderis & Izydorczyk, 2007). Siendo el contenido de peso de la galactosa en la goma de algarroba de 17-26 %, goma de tara de aproximadamente 25 % en peso, goma de guar de 33-40 % en peso y fenogreco de 47-48 % en peso (Wielinga, 2009).

Las gomas de semillas son de carga principalmente no iónica (goma guar, algarrobo y de tara (Singh & Barreca, 2020). El mecanismo de acción de los hidrocoloides neutros es la formación de barreras estéricas que implica el aumento de la viscosidad de la fase continua (Hansen, 1993 citado por Msagati, 2012). En general, los galactomananos, que son no

iónicos, se hidratan más lentamente que los hidrocoloides iónicos como la carboximetilcelulosa (CMC), además, son compatibles con la mayoría de los biopolímeros como almidones, celulosa, entre otros (debido a que son moléculas neutras) (BeMiller, 2019b).

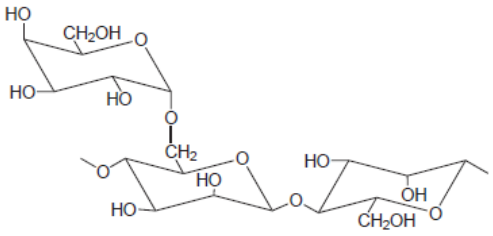


Figura 3: Representación de un segmento de molécula de galactomanano

FUENTE: BeMiller (2019b)

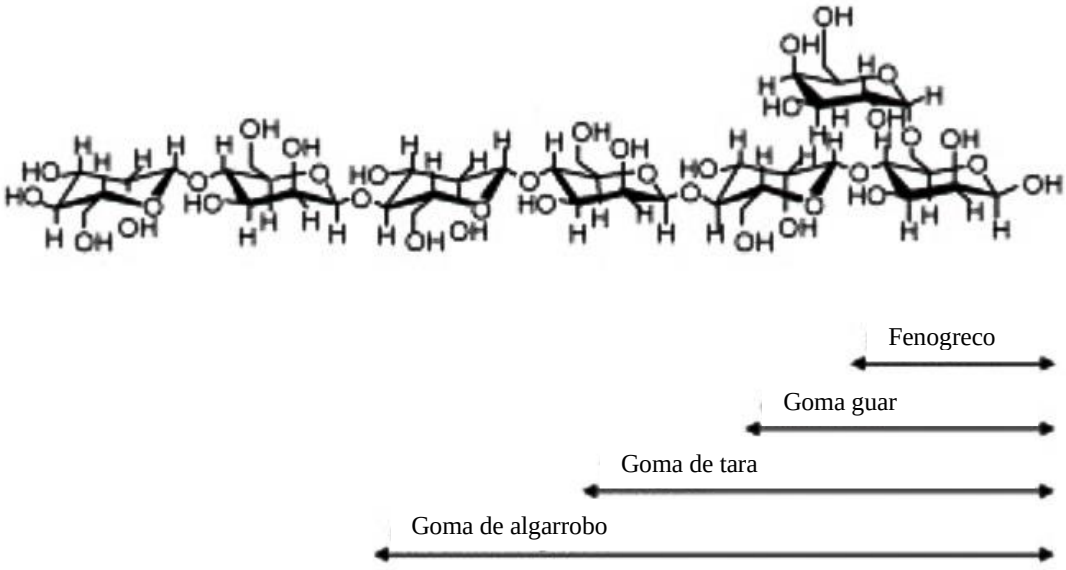


Figura 4: Unidades de repetición teóricas de cuatro galactomananos diferentes

FUENTE: Wielinga (2009)

2.5. GOMA DE TARA

La goma de tara es un polvo blanco o beige que se obtiene de la molienda del endospermo de la semilla del arbusto de *Caesalpinia spinosa,* es originario de Perú y se encuentra ampliamente cultivado en varios países (Ma et al., 2016; Wu et al., 2015). Es un arbusto espinoso de hoja perenne que crece entre 3 y 10 m, con una vaina plana de la tara de 10 cm de largo y 1-3 cm de ancho y contiene varias semillas (Figura 5) (Prajapati et al., 2013).

La composición aproximada de las semillas de tara es de 38% de cáscara, 40% de germen y 22% de endospermo (peso en base seca). Aproximadamente, 1500 ± 2000 toneladas de goma de tara al año están disponibles a nivel mundial para la industria alimentaria (Wielinga, 2009).



Figura 5: Goma de tara en forma de: (a) vainas, (b) semillas y (c) polvo

FUENTE: Prajapati et al. (2013)

La goma de tara es un polisacárido de alta viscosidad compuesto principalmente por una cadena lineal de unidades de (1-4)-β-D-manopirosa con unidades de α-D-galactopiranosa unidas por enlaces (1-6) (Figura 6). La sustitución de galactosa en la goma de tara se produce aproximadamente en una de cada tres unidades de manosa, es decir la proporción de manosa y galactosa en la goma de tara es de 3:1 (Antoniou et al., 2015; Mortensen et al., 2017), siendo similar a otras gomas y donde la proporción de manosa y galactosa en la goma de tara es intermedia entre la goma de algarrobo (alrededor de 4:1) y la goma de guar (alrededor de 2:1) (BeMiller, 2019b; Wu et al., 2015). Debido a esta característica, la goma de tara

puede presentar propiedades interesantes como solubilidad, propiedades reológicas y otras propiedades funcionales de la goma, que dependen de la masa molar, la relación manosa: galactosa y la forma en la que están ubicados los sustitutos de la galactosa a lo largo de la cadena del manano (Mathur, 2012).

La goma de tara presenta una solubilidad intermedia en agua con respecto a la goma guar (soluble en frío) y a la goma de algarrobo (insoluble en frío), por lo que posee una naturaleza hidrocoloide única cuando se utiliza en la industria alimentaria (Nuvoli et al., 2021; Wu et al., 2015). La goma de tara es parcialmente soluble en agua fría hasta aproximadamente el 80% de su peso seco, siendo la capacidad de espesamiento de la goma de tara mayor que la de la goma de algarrobo y comparable a la de la goma guar (Prajapati et al., 2013). Este parámetro depende del tamaño o longitud de las cadenas de manano sustituido que están disueltas (Wielinga, 2009).

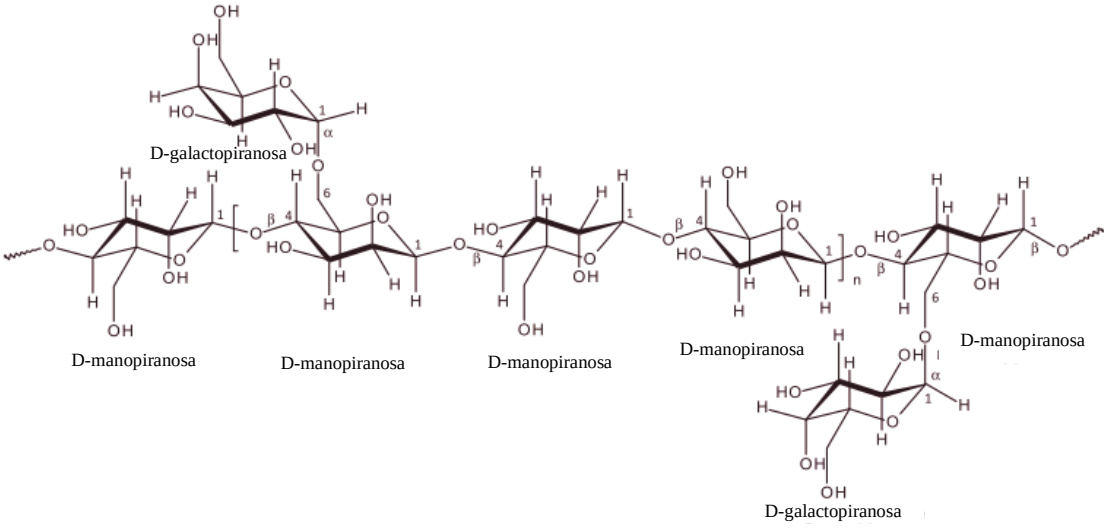


Figura 6: Estructura de la goma de tara formada por manosa y galactosa

FUENTE: Mortensen et al. (2017)

La goma de tara es utilizada como aditivo alimentario debido a su capacidad de actuar como agente estabilizante, emulsionante y espesante, y por su capacidad de evitar efectos indeseables en productos gelificados como, por ejemplo, la sinéresis (Ingrassia et al., 2019),

siendo sus propiedades cercanas a la goma guar más que a la de la goma de algarrobo. La goma de tara es utilizada en productos lácteos (como helados, yogur helado y queso crema) (BeMiller, 2019b).

Asimismo, representa una alternativa al uso de la goma de guar y goma de algarrobo, debido a que el precio de estas dos últimas gomas ha aumentado considerablemente por el aumento de la demanda; además, el árbol de tara presenta un ciclo crecimiento corto, lo que permite un precio más bajo de esta goma (Wu et al., 2015).

2.6. BIOPLÁSTICOS

Un material plástico se define como bioplástico si es de base biológica, biodegradable o presenta ambas propiedades (European Bioplastics, 2018) y pueden clasificarse en tres principales grupos (EuropeanBioplastics, 2018; Ross et al., 2017) (Figura 7):

- Bioplásticos de base biológica no biodegradable: plásticos de polietileno (PE), polipropileno (PP), poli (tereftalato de etileno) (PET), poli (tereftalato de trimetileno) (PTT) derivados total o parcialmente de intermediarios de base biológica.

- Bioplásticos de base biológica y biodegradables: como ácido poliláctico (PLA) y poli(hidroxialcanoato) (PHA) o poli (succinato butileno) (PBS). También están incluidos macromoléculas a base de carbohidratos como derivados de almidón o celulosa, que son utilizados con frecuencia en mezclas de bioplásticos biodegradables.

- Bioplásticos de origen fósiles que son biodegradables, como la poli(ε-caprolactona) (PCL) o el poli (adipato-co-tereftalato de butileno) (PBAT).

Dentro de los bioplásticos del segundo grupo, se puede encontrar los bioplásticos cuyo desarrollo implica el uso de materias primas renovables, como polisacáridos o proteínas que pueden ser extraídos de fuentes agrícolas, marinas, animales (base biológica) o inclusiones intracelulares; y que cuando las condiciones adecuadas del medio ambiente sean las adecuadas (humedad óptima del suelo, microorganismos y oxígeno), estos pueden ser

degradados en sustancias simples (agua y dióxido de carbono) y biomasa (biodegradabilidad) (González & Alvarez, 2013; Meritaine da Rocha et al., 2018).

Silva et al. (2020) reportan que el tamaño del mercado de bioplásticos y biopolímeros fue de 6000 millones de dólares en 2017 y que se pronostica que alcance los 14920 millones de dólares en 2023, siendo la industria del envasado uno de los principales promotores del consumo de bioplásticos y biopolímeros como señala European Bioplastics (2021), que indica que la aplicación de envases fue casi el 48% (1.14 millones de toneladas) del mercado total de bioplásticos en 2021 (Figura 8).

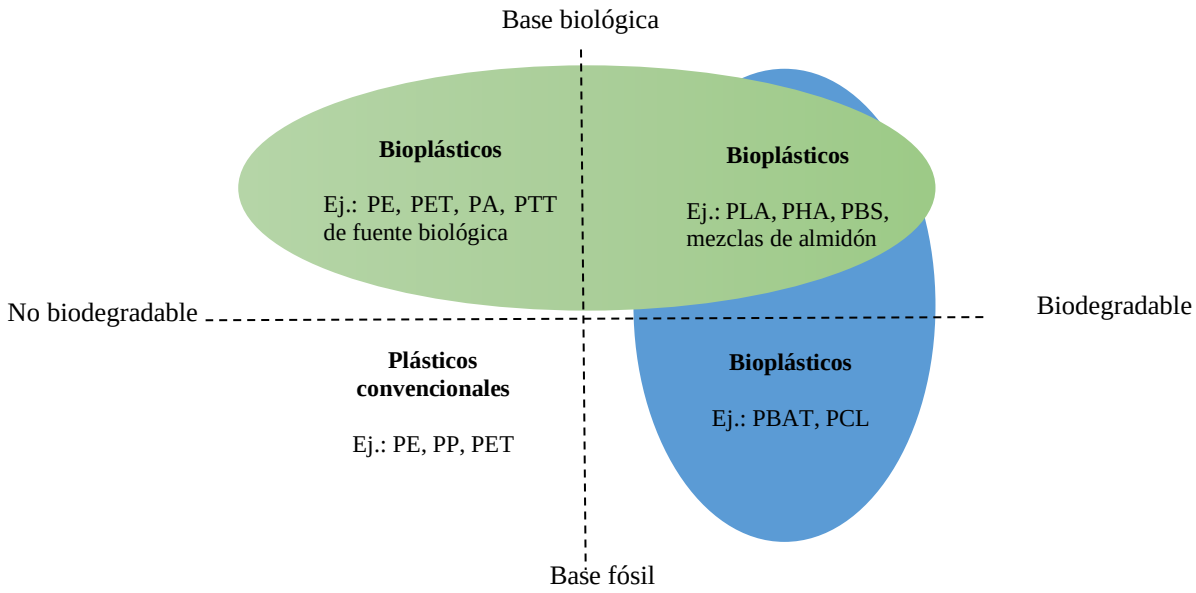


Figura 7: Clasificación de los bioplásticos

FUENTE: European Bioplastic (2018)

Debido a la creciente demanda de los consumidores por productos más sostenibles y las regulaciones gubernamentales favorables para las políticas de compras verdes, las aplicaciones de bioplásticos se están diversificando, desde la electrónica hasta los textiles, los envases y otros productos de consumo (Jõgi & Bhat, 2020; Silva et al., 2020).

En la actualidad existen bioplásticos alternativos para la mayoría de los plásticos convencionales que ofrecen las mismas propiedades materiales y, además, aportan un valor agregado debido a la reducción de la huella de carbono y la opción de gestión de residuos

más respetuosas con el medio ambiente, como la biodegradación o el compostaje industrial (Jõgi & Bhat, 2020).

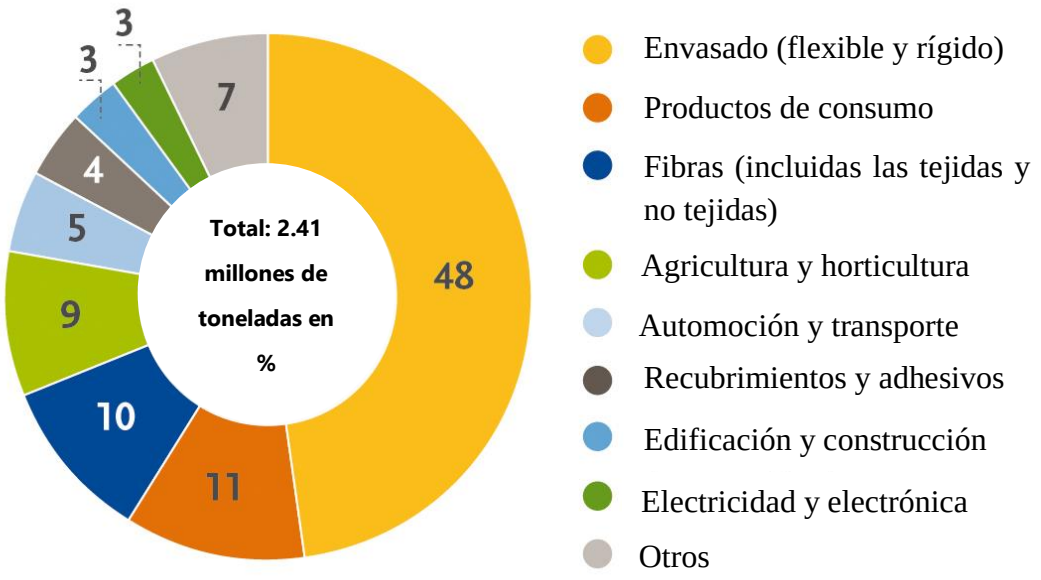


Figura 8: Producción mundial de bioplásticos en 2021 (por segmento de mercado)

FUENTE: European Bioplastic (2021)

2.7. PELÍCULAS BIODEGRADABLES

El término película se utiliza ampliamente en las aplicaciones de envasado de alimentos y consiste en una capa delgada de materiales biopoliméricos (Atarés & Chiralt, 2016). Sin embargo, los términos, películas y recubrimientos son utilizados en ocasiones como sinónimos, pero difieren en la forma de preparación (Bierhalz et al., 2020). Las películas son moldeadas primero como una lámina elástica y posteriormente se aplican sobre la superficie del producto o entre los componentes de los alimentos, mientras que los recubrimientos se forman directamente sobre las superficies de los alimentos después del contacto del producto con la solución formadora de película (SFP) (Atarés & Chiralt, 2016; Bierhalz et al., 2020).

La elección del grado de flexibilidad de la película depende de las necesidades específicas de la aplicación y del producto, así como de consideraciones ambientales. Las características de flexibilidad de las películas se pueden clasificar de la siguiente manera (Herrera, 2018):

a) Flexible: Adecuadas para aplicaciones que requieren adaptabilidad a diferentes formas y capacidad de conformarse a diferentes formas. Este material es utilizado normalmente en bolsas, envases flexibles y envoltorios que necesitan ajustarse a la forma del producto.
b) Semi-rígido: Ofrecen una combinación de flexibilidad y rigidez moderada. Son apropiados para aplicaciones que requieren cierta resistencia estructural, como envases que deben mantener su forma, pero también permitir cierta flexibilidad.
c) Rígido: Más firmes y estructuradas, son ideales para aplicaciones donde se requiera un soporte más sólido, como envases para productos que necesitan conservar su forma y protegerse contra posibles daños.

Los envases flexibles se componen principalmente de polímeros biodegradables, mientras que los envases rígidos, en su mayoría, contribuyen a la producción de envases no biodegradables (Shaikh et al., 2021). Los envases de base biológica deben funcionar como los envases convencionales y presentar todas las funciones requeridas de contención, preservación, información y conveniencia de manera legal, ambiental y rentable (Sam et al., 2015).

Cuando se aplican en productos alimentarios, las películas desempeñan funciones como protección del producto de daños mecánicos, acciones físicas, químicas y microbiológicas. Su aplicación en productos alimentarios, especialmente aquellos altamente perecederos como los hortícolas y frutícolas, se respalda en propiedades importantes como el costo, la disponibilidad, los atributos funcionales, las propiedades mecánicas (flexibilidad, tensión), las propiedades ópticas (brillo y opacidad), el efecto de barrera contra el flujo de gases, la resistencia estructural al agua y a los microorganismos y la aceptabilidad sensorial (Falguera et al., 2011).

2.7.1. MATERIA PRIMA UTILIZADA PARA LA ELABORACIÓN DE PELÍCULAS BIODEGRADABLES

a. POLÍMERO BIODEGRADABLE

Los principales polímeros formadores de películas son los polisacáridos, proteínas, lípidos y resinas, estando las características físicas y químicas propias de los biopolímeros relacionados en gran medida en las propiedades de las películas y recubrimientos resultantes (Han, 2014; Meritaine da Rocha et al., 2018). Los materiales formadores de películas pueden ser hidrofílicos o hidrofóbicos, o ambos; no obstante, los solventes utilizados deben limitarse a agua o etanol con el objetivo de mantener la comestibilidad (Peyron, 1991 citado por Han, 2014).

El almidón es un material muy prometedor debido a su disponibilidad anual en muchas plantas como tubérculos, tallos, semillas y hojas, por lo que, su uso para la producción de películas biodegradables ha sido ampliamente estudiado debido a su alta renovabilidad, abundancia, bajo costo, biodegradabilidad sin residuos tóxicos y gran habilidad para formar películas inodoras, incoloras y transparentes (Havstad, 2020; Meritaine da Rocha et al., 2018).

El almidón nativo, en su forma original, carece de propiedades termoplásticas; sin embargo, al agregar plastificantes, someterlo a procesos térmicos y aplicar esfuerzo cortante, experimenta la gelatinización y muestra su carácter termoplástico (Zhang et al., 2014). El almidón termoplástico (TPS) o almidón plastificado, es altamente sensible a la humedad, sus propiedades térmicas cambian con el contenido de agua y actúa como una alternativa para los polímeros sintéticos (Shaikh et al., 2021). Además, es naturalmente flexible, impermeable al oxígeno, estable a temperaturas y soluble en agua (Dhall & Alam, 2019). El proceso de obtención del TPS mediante el método Casting es descrito en la sección 2.7.2.

Sin embargo, las películas formadas a partir de este almidón poseen débiles propiedades barrera al vapor de agua y son frágiles (Rydz et al., 2018), no obstante, estas deficiencias pueden ser superadas mediante la incorporación de aditivos, como lípidos, otros

hidrocoloides o agentes de refuerzo, favoreciendo la obtención de materiales más estables y disminuyendo las debilidades propias del almidón natural (Silva et al., 2020).

La mezcla con otros biopolímeros es una técnica rentable en donde los componentes pueden combinarse en estado fundido o solubilizarse en el mismo disolvente para formar un material homogéneo, es por lo que, la miscibilidad y la compatibilidad de los componentes es sumamente importante (Bierhalz et al., 2020; Gonçalves de Moura et al., 2017).

b. PLASTIFICANTE

Los plastificantes son agentes de bajo peso molecular que se incorporan a los materiales formadores de película con el objetivo de incrementar la termoplasticidad de los polímeros, se posicionan entre las moléculas de estos e interfieren entre las interacciones polímero-polímero para mejorar la flexibilidad y procesabilidad, aumentando el volumen libre y los movimientos de la cadena (Byun et al., 2014; Han, 2014). Además, la adición de plastificante reduce la viscosidad del fundido, el módulo elástico de los polímeros y disminuye la temperatura de transición vítrea (Tg) (Byun et al., 2014).

La mayoría de los plastificantes son muy hidrófilos e higroscópicos, por lo que pueden atraer moléculas de agua y formar un gran complejo hidrodinámico de plastificante-agua (Han, 2014) y son añadidos como materiales formadores de película con el fin de superar la fragilidad del almidón y lograr la biodegradabilidad completa en las mezclas (Kumar et al., 2020).

c. ADITIVOS

Las películas y los recubrimientos comestibles pueden contener diversos agentes activos, como emulsionantes, antioxidantes, antimicrobianos, nutracéuticos, sabores y colorantes, que, con el objetivo de mejorar la calidad y la seguridad de los alimentos, pero también las propiedades físicas y mecánicas de las películas (Han, 2014).

2.7.2. PROCESOS DE OBTENCIÓN

Existen dos procesos de obtención para películas de acuerdo con Guilbert & Gontard (2005):

- "Proceso seco" como la extrusión de termoplásticos que se basa en las propiedades termoplásticas de los biopolímeros cuando se plastifican y se calientan por encima de su temperatura de transición vítrea en condiciones de bajo contenido de agua.

- "Proceso húmedo" o "de solventes" (método Casting) que se basa en el secado o dispersión de la solución formadora de película. Autores diversos señalan valores de humedad final de entre 10 al 25% en películas elaboradas con almidones y otros polímetros (Askari et al., 2018; De Morais Lima et al., 2017; Nandi & Guha, 2018; Saberi et al., 2016; Singh et al., 2015).

El método de Casting es un método comúnmente utilizado para elaborar películas a escala de laboratorio (Han, 2014; Ramírez López, 2016). Este método consiste en dispersar todos los materiales formadores de película (polímeros, plastificante y aditivos) usando el disolvente adecuado con el objetivo de formar una solución homogénea. Como la película debe ser biodegradable, la elección de agua, etanol o sus mezclas son apropiados como solventes (Han, 2014). La masa molar del biopolímero y del plastificante, el tipo, la concentración y el tipo de disolvente utilizado son los principales parámetros que afectan a la viscosidad de la solución o suspensión formadora de película (SFP) (Bierhalz et al., 2020). Posteriormente, se aplica la SFP en una placa de Petri, controlando el espesor por la relación masa de SFP/área de la placa. Finalmente, se realiza un secado de dicha SFP a temperatura y humedad relativa controlada en una estufa de convección forzada, para eliminar el disolvente y formar la estructura de la película (Meritaine da Rocha et al., 2018; Zhang et al., 2014). En la Figura 9 se ilustra el proceso de elaboración de películas mediante el método Casting. Este método a escala de laboratorio nos permite evaluar la capacidad del polímero para formar matrices filmogénicas y sus propiedades (do Val Siqueira et al., 2021).

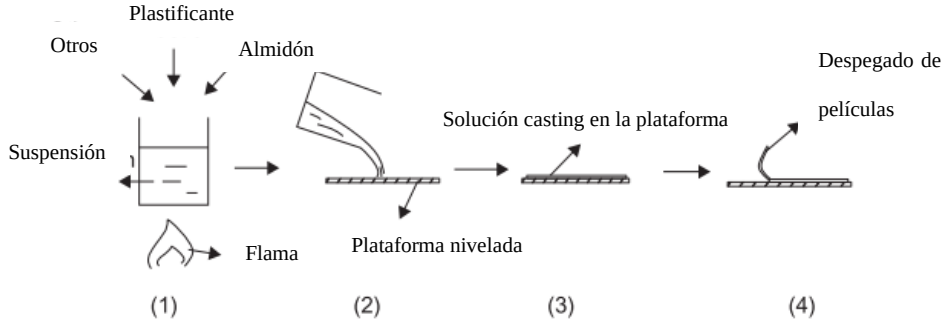


Figura 9: Proceso de elaboración de películas mediante el método casting: (1) Suspensión formadora de película y gelatinización. (2) Casting de la solución formadora de película en la plataforma nivelada (SFP). (3) Enfriamiento y secado. (4) Despegado de las películas secas de la plataforma

FUENTE: Zhang et al. (2014)

2.7.3. USOS Y APLICACIONES

Los factores que impulsan el crecimiento del uso de los plásticos biodegradables están relacionados con la preferencia del consumidor hacia productos más amigables con el medio ambiente, el uso de materia prima renovable y de base biológica, la biodegradabilidad y las políticas gubernamentales hacia lo más "verde" (Ashter, 2016). Los consumidores de alimentos son cada vez son más exigentes y conscientes del impacto ambiental de los plásticos sintéticos, por lo que buscan alternativas más amigables para satisfacer sus necesidades (Rydz et al., 2018).

Por los motivos anteriormente mencionados, los bioplásticos son utilizados cada vez en un mayor número de mercados, desde envases, productos de catering, electrónica de consumo, automoción, agricultura/horticultura y juguetes hasta textiles y otros segmentos. En la Tabla 1 se muestran algunas aplicaciones de bioplásticos realizadas por diversas compañías.

Ciertas aplicaciones donde la corta vida útil es muy importante, como en el desarrollo de bolsas de basura compostables y bolsas de compras, se requiere que estas sean fuertes, flexibles, resistentes a la rotura y al daño, además deben ser resistentes a la humedad y a los

cambios de temperatura debido a su composición. Después de su uso, estas bolsas se descomponen en el suelo o en el compost, transformándose en dióxido de carbono y agua en un lapso de varias semanas. Es importante destacar que este proceso no afecta la calidad del compost resultante, según lo señalan Dhall & Alam (2019) y Kumar et al. (2020).

Tabla 1: Aplicaciones de los bioplásticos

Aplicaciones de empaque	Material de empacado biopolímero	Compañía
Papas fritas	Bolsas PLA	PepsiCo's Frito-lay
Yogur	Botellas PLA	Stonyfield (Danone)
Pan	Bolsas de papel con ventanas de PLA	Delhaize (retailer)
Cortes de frutas frescas y vegetales	Bandejas y packs de PLA rígidos	Asda (retailer)
Café y té	Vasos de cartón recubiertos con PLA	KLM
Bebidas	Vasos PLA	Mosburger (Japan)
Ensaladas frescas	Cuencos PLA	McDonald's
Tomates orgánicos	Envases a base de maíz	Iper supermarkets (Italy)
Chocolatadas	Bandejas de maicena	CoopItalia Cadbury Schwepps
Pasta orgánica	Envases a base de celulosa	Birkel
Kiwi	Bandejas de base biológica envueltas con película de celulosa	Wal-Mart

FUENTE: Kumar et al. (2020)

Otra aplicación en la agricultura son las películas de mantillo biodegradables, que ayudan a aumentar el rendimiento, mejorar el control de malezas, mejorar la calidad de los cultivos y disminuir el riego con agua, así como reducir el uso de pesticidas. También pueden ser utilizadas en la industria del catering, donde pueden utilizarse en los empaques de los servicios, como vasos, platos, tazones, bandejas, cajas de comida para llevar, cubiertos, bolsas y cañitas. Asimismo, pueden ser utilizadas en envases para alimentos con vida útil corta donde se requiera una presentación atractiva o prologar la vida útil de los mismos,

como bolsas compostables, mallas y bandejas para frutas, verduras, huevos y carne fresca. También pueden utilizarse en envases rígidos como envases o botellas, donde el PLA es el principal material plástico biodegradable que se utiliza para bebidas sin gas y productos lácteos (Havstad, 2020). Los recubrimientos comestibles permiten fortalecer estructuralmente ciertos alimentos, reducir la acumulación de partículas y mejorar las características visuales y táctiles en las superficies de los productos (Guilbert & Gontard, 2005). Otras funciones que pueden cumplir las películas son evitar la pérdida de agua, el cambio de sabor o color en un producto alimenticio, inhiben el desarrollo de microorganismos seleccionados y los procesos de enranciamiento de grasas, ya que inhiben el acceso de oxígeno (Meritaine da Rocha et al., 2018).

Es sumamente importante destacar que el uso de productos biodegradables no es la única solución a los problemas medioambientales, sino que debe tratar de verse como parte de la solución junto con otras medidas como la reducción del consumo, la reutilización de productos y el reciclaje (Kumar et al., 2020).

2.8. CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE PELÍCULA

2.8.1. PROPIEDADES FÍSICAS

La resistencia al agua de las películas biodegradables es deseable para mantener la integridad de la película cuando estas se utilizan en la conservación de alimentos de humedad alta o intermedia (Ozdemir & Floros, 2008). Para aplicaciones donde la película deba estar en contacto con agua durante el procesamiento de un alimento recubierto, se desea una solubilidad en agua baja. Por el contrario, películas con alta solubilidad pueden ser requeridas para contener porciones que se disolverán en agua o en comida caliente (Gontard et al., 1992).

Por otro lado, el grado de hinchamiento es la capacidad de los sistemas poliméricos de absorber la solución de interés, lo que nos brinda información del comportamiento del material polimérico durante su aplicación. En el empacado de alimentos, es deseable que el material posea un bajo grado de hinchamiento, por lo que, es importante considerar factores

como la naturaleza del polímero, la interacción solvente/polímero, y la estructura de este (Tomoda et al., 2020).

2.8.2. PROPIEDADES MECÁNICAS

El estudio de las propiedades mecánicas es fundamental en el área de los biopolímeros, porque las propiedades mecánicas definen las limitaciones y el comportamiento del biopolímero (Tomoda et al., 2020).

Las propiedades mecánicas en las películas se evalúan principalmente por ensayos de tracción. La capacidad de tracción de un biopolímero se caracteriza por una tracción frente a curva de deformación (Figura 10), que proporciona propiedades esenciales del material, como el alargamiento a la rotura (deformación), módulo de Young y fuerza de tracción (Callister, 2020). La fuerza de tracción es también conocida como resistencia a la tracción o fuerza de tensión, y es determinada en el momento de la rotura. Las propiedades mecánicas dependen del tipo de polímero y de los aditivos utilizados (Guilbert & Gontard, 2005).

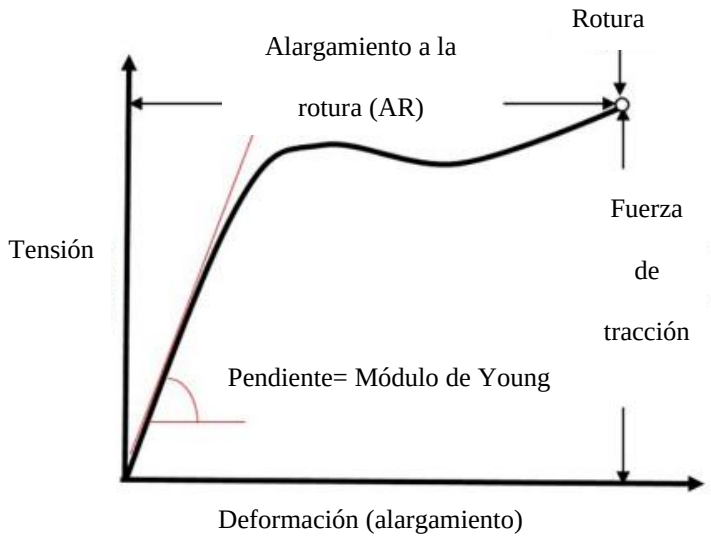


Figura 10: Curva típica de deformación por tracción en películas de biopolímeros

FUENTE: Tomoda et al. (2020)

2.8.3. PROPIEDADES DE BARRERA

La determinación de las propiedades barrera es importante debido a que te permite estimar la vida útil del producto (Meritaine da Rocha et al., 2018), siendo el vapor de agua y el oxígeno las dos principales propiedades barrera y las más estudiadas, esto debido a que pueden transferirse desde el ambiente interno o externo a través de la pared del empaque del polímero, lo que puede resultar en un cambio continuo en la calidad del producto y vida útil (Siracusa et al., 2008). Debido a la transferencia de vapor de agua, gases, aroma, sabor o color hacia y desde el entorno circundante pueden ocurrir pérdidas significativas en la calidad de los alimentos (Tomoda et al., 2020; Wihodo & Moraru, 2013).

Las propiedades de barrera al oxígeno de la película y de las capas de recubrimiento pueden prevenir la oxidación de los ingredientes lipídicos, los colorantes y los sabores de los productos alimenticios (Han, 2014). Mientras que, las propiedades de barrera al vapor de agua en las películas y recubrimientos comestibles están relacionadas a su contenido de humedad, que son de gran importancia para mantener o extender su vida útil, por ejemplo, en el caso de productos alimenticios frescos es importante evitar la deshidratación mientras que en productos de panificación o charcutería es importante evitar la penetración del agua (Siracusa et al., 2008).

El requisito de barrera específico del sistema de envasado está relacionado con las características del producto y el uso final previsto de la aplicación (Meritaine da Rocha et al., 2018). Factores como la naturaleza, la composición de la película y las condiciones ambientales (humedad y temperatura) influyen en la eficacia de la película como barrera; donde por ejemplo, películas con polímeros altamente polares (como el almidón y la proteína) exhiben una alta permeabilidad al vapor de agua (PVA) pero una baja permeabilidad al O_2 y CO_2; y con valores altos de humedad relativa y una temperatura creciente, el contenido de humedad y la permeabilidad al oxígeno también pueden incrementar (Wihodo & Moraru, 2013).

2.8.4. PROPIEDADES ÓPTICAS

La luz actúa como un catalizador de procesos de oxidación y degradación en los compuestos nutricionales de los alimentos, por lo que, para evitarlos se adicionan componentes específicos que absorben la luz en el espectro UV/Vis. Las propiedades relacionadas con estos efectos barrera a la luz son la opacidad y la transmisión de luz.

El color de la película está directamente relacionado con el aspecto visual de la misma, esta debe ser atractiva para el consumidor y no debe influenciar en el color del producto empacado como resultado del tiempo de almacenamiento (Meritaine da Rocha et al., 2018). Está directamente influenciado con el tipo y la concentración del material añadido (Atarés & Chiralt, 2016).

2.8.5. BIODEGRADABILIDAD

De acuerdo con la ASTM (2005), un material es definido como biodegradable si es "Capaz de sufrir descomposición en dióxido de carbono, metano, agua, compuestos inorgánicos o biomasa donde el mecanismo predominante es la acción enzimática de microorganismos, que puede medirse mediante pruebas estándar, en un período específico de tiempo, reflejando la condición de disposición disponible" (Dhall & Alam, 2019).

La biodegradación, como se describe en la Figura 11, consiste en dos etapas: fragmentación, es decir, acortamiento y debilitamiento de las cadenas de polímeros bajo la influencia del calor, humedad, luz solar y/o enzimas; y la mineralización, que es la asimilación completa de los fragmentos por parte de la población microbiana en el entorno (Havstad, 2020).

Para que un plástico se considere biodegradable debe conseguir la biodegradación completa (tanto fragmentación como mineralización) (Havstad, 2020). Los materiales biodegradables pueden descomponerse fácilmente por agentes naturales como agua, oxígeno, luz solar, microorganismos en condiciones aerobias o anaerobias, etc. (Dhall & Alam, 2019; Kumar et al., 2020).

La biodegradabilidad de los plásticos depende de las materias primas, la composición química y la estructura del producto final, así como de las condiciones ambientales (ubicación y temperatura, siendo las más importantes) en las que se espera que el producto se biodegrade, lo cual a menudo se pasa por alto (Havstad, 2020).

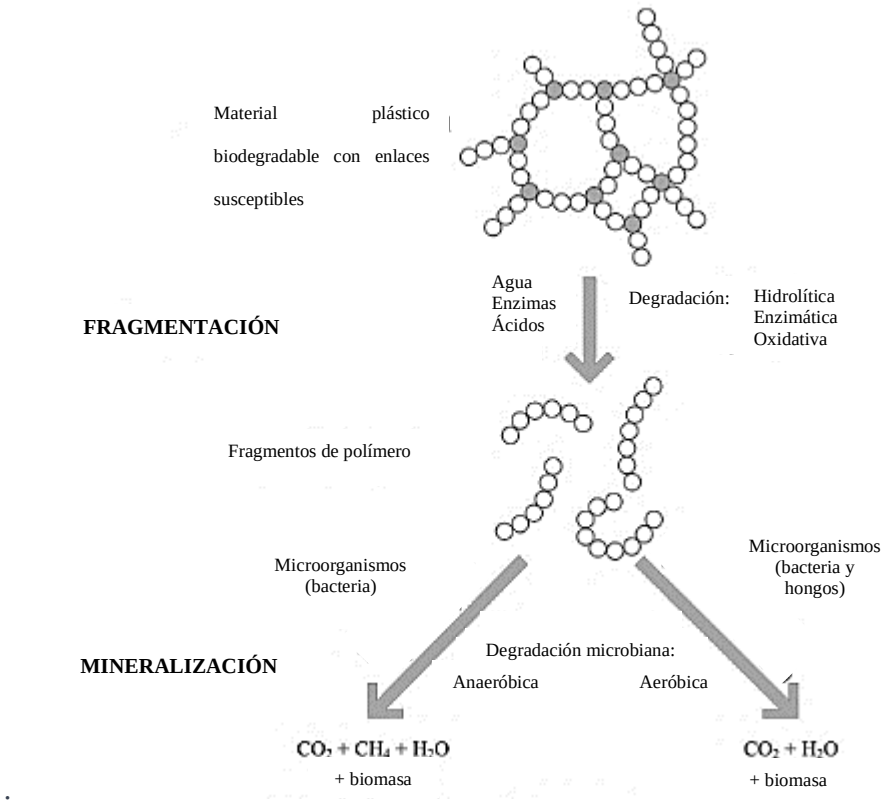


Figura 11: Etapas de la biodegradación

FUENTE: Havstad (2020)

De acuerdo con la ISO 17088 (2021), se considera que un producto plástico ha alcanzado una desintegración completa cuando se descompone al 90% o más, después de 84 días en una prueba de compostaje controlada, transformándose en fragmentos de menos de 2 mm. Esto se demuestra al confirmar que no más del 10% de la masa seca original permanece después de pasar por una malla de 2 mm. Se aplica una tolerancia del 10% con el fin de considerar la variabilidad inherente a los procesos biológicos.

2.8.6. PROPIEDADES ESTRUCTURALES Y MORFOLÓGICAS

a. ESPECTRÓMETRO INFRARROJO CON TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR)

La radiación infrarroja es energía electromagnética con longitudes de onda (λ) mayores que la luz visible pero más cortas que las microondas. En general, se pueden utilizar longitudes de onda de 12500 a 100 cm^{-1} para la espectroscopía infrarroja y se dividen en la región del infrarrojo cercano (12500–4000 cm^{-1}), el infrarrojo medio (4000–650 cm^{-1}) y el infrarrojo lejano (650–100 cm^{-1}) (Rodriguez-Saona et al., 2017).

La espectroscopía infrarroja media es muy útil en el estudio de compuestos orgánicos porque las bandas de absorción están relacionadas con los modos vibratorios de grupos funcionales específicos. La posición de la banda y su intensidad se correlacionan con la energía del enlace, su entorno y su concentración en la matriz, lo que hace que la espectroscopía infrarroja media sea ideal para aplicaciones cualitativas y cuantitativas (Rodriguez-Saona et al., 2017).

El espectrómetro infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR) es uno de los instrumentos más modernos y preferidos basados en la espectroscopía infrarroja. El fundamento de la tecnología espectroscópica infrarroja está en las vibraciones atómicas de una molécula que solo absorbe frecuencias y energías específicas de la radiación infrarroja. Las moléculas podrían ser detectadas y clasificadas por FTIR porque cada molécula tiene un espectro infrarrojo único (Barraza-Garza et al., 2013).

Los picos en el espectro IR de una muestra representan la excitación de modos vibratorios de las moléculas en la muestra, y están asociados a diversos enlaces químicos y funcionales presentes en las moléculas. Puede considerarse como la “huella digital” de un compuesto. Es una herramienta de análisis cuantitativo ya que, la cantidad de energía infrarroja absorbida por un compuesto es proporcional a su concentración (Mondragón, 2020) (Figura 12).

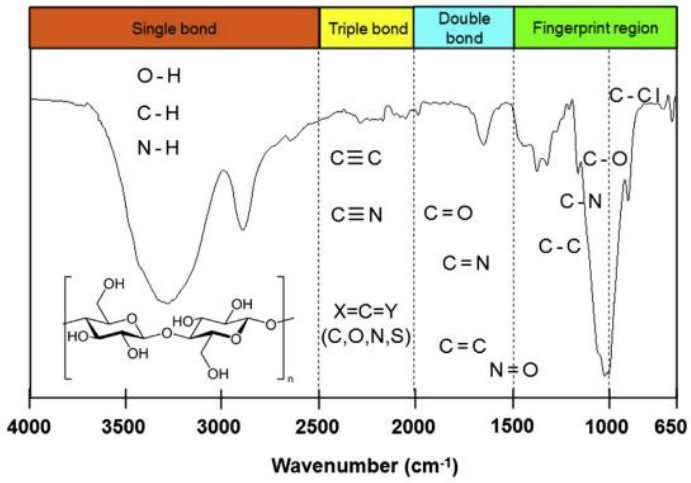


Figura 12: Espectro infrarrojo típico con transformada de Fourier de membrana de celulosa regenerada con los diversos enlaces que absorben las regiones aproximadas

FUENTE: Mohamed et al. (2017)

El accesorio de reflectancia total atenuada (ATR) permite obtener espectros infrarrojos de muestras con poca o ninguna preparación de la muestra, elimina las variaciones en las longitudes de trayecto de la celda y proporciona una recolección de espectros consistente (Rodriguez-Saona et al., 2017).

La técnica FTIR-ATR es ampliamente utilizada en la caracterización de películas (o membranas) con el objetivo de evaluar (Tomoda et al., 2020):

- La interacción entre la mezcla de biopolímeros de la película
- Estudio de procesos de entrecruzamiento, iónico o covalente, en películas de biopolímeros
- Evaluación de las interacciones químicas entre los compuestos bioactivos de la matriz biopolimérica en películas que se utilizan
- Evaluación de la interacción química de adsorbatos contaminantes con la matriz biopolimérica en películas utilizadas para la remoción de contaminantes de efluentes

b. MICROSCOPÍA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM)

Las técnicas de microscopía son comúnmente utilizadas para estudiar la estructura y morfología de las películas. La microscopía electrónica de barrido (SEM) es una técnica sofisticada que utiliza electrones como fuente de excitación para escanear la superficie de interés (Dong & Jeor, 2017). La técnica SEM es utilizada para el análisis de superficies y fracturas, con el fin de identificar la estructura de la muestra y la característica de la superficie y secciones transversales en las películas (Meritaine da Rocha et al., 2018; Tomoda et al., 2020). Los rangos de posible aumento de lente son de 1000x a 2000x (Assis et al., 2017).

2.9. DISEÑO DE MEZCLAS SIMPLEX

El diseño de mezclas simplex es una técnica utilizada en la optimización de formulaciones que involucran múltiples componentes, estudiando combinaciones específicas de los componentes en proporciones variables, pero sujetas a restricciones (Cornell, 2002). Este diseño permite evaluar el efecto de la variación de las proporciones de los componentes en las propiedades de la mezcla, lo que permite determinar la combinación optima que cumpla con ciertos criterios o que maximice ciertas propiedades deseables (Squeo et al., 2021).

Las mezclas se representan mediante el llamado "simplex" que es el objeto más simple en el espacio de una dimensionalidad definida (n, igual al número de componentes de la mezcla con n-1 dimensiones. En el caso de una mezcla binaria, el simplex es una línea en una dimensión, en el caso de una mezcla ternaria, el simplex en un triángulo en dos dimensiones, para una mezcla cuaternaria, el simplex es un tetraedro en 3 dimensiones (Squeo et al., 2021). En la Figura 13, se muestra el simplex para una mezcla de tres componentes. Este grafico se puede explicar de la siguiente formar:

- Los vértices corresponden a los componentes puros (es decir, 100% de X1, X2, X3, puntos A, B y C respectivamente).

- Los lados del simplex corresponden a todas las mezclas binarias formadas por los componentes en los vértices del lado en consideración, mientras que el componente en el vértice opuesto está ausente (por ejemplo, punto D).

- Cualquier punto dentro del simplex representa una mezcla ternaria (por ejemplo, punto E).

- Para cada punto en el simplex, se cumple la restricción implícita de que la suma total de los componentes es igual al 100%, lo que significa que los factores de una mezcla ya no son independientes, es decir que, aumentar la cantidad de X1, necesariamente causará modificaciones en los otros componentes.

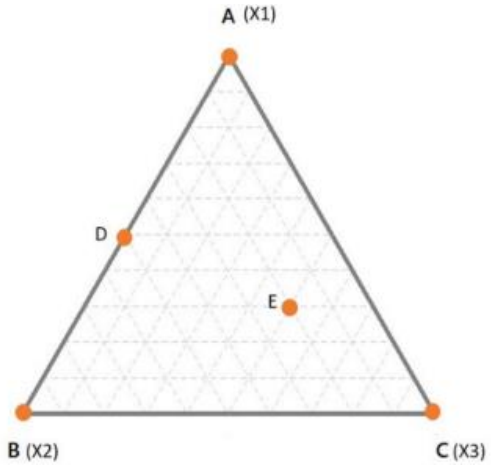


Figura 13: Un simplex para una mezcla ternaria. Las líneas punteadas indican intervalos del 10 por ciento de los componentes

FUENTE: Squeo et al. (2021)

III. METODOLOGÍA

3.1. LUGAR DE EJECUCIÓN

El trabajo de investigación se realizó en el Laboratorio de Investigación e Instrumentación de la Facultad de Industrias Alimentarias (FIAL) de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM). El análisis de las propiedades morfológicas y estructurales de las películas desarrolladas, mediante las técnicas de FTIR y SEM, se llevaron a cabo en el laboratorio de investigación de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI).

3.2. MATERIA PRIMA

Los almidones utilizados fueron extraídos de la variedad de papa nativa amarga: Ocucuri negra (*Solanum curtilobum*), que fue cultivada en la provincia del Collao, distrito Ilave (Puno, Perú) a 3862 m.s.n.m. y cosechadas de los campos de un agricultor local. A partir de la papa se realizó la transformación de esta en tunta siguiendo el flujo mostrado en la Figura 1. La extracción de almidón se realizó en la planta industrial de la empresa Agro Industrias MAJU (Tarma, Junín, Perú) bajo el método en húmedo que consiste en la reducción del tamaño de la papa o tunta y en el retiro en medio líquido componentes de la pulpa que son relativamente más grandes, como la fibra y proteína; después, se realiza la eliminación del agua por decantación o centrifugación y se procede a un lavado del material sedimentado para eliminar las últimas fracciones diferentes al almidón y finalmente el almidón purificado se somete a un secado (Cuba, 2021). A partir de este proceso de obtuvo almidón de papa (AP) y almidón de tunta (AT) de la variedad Ocucuri negra (Anexo 1).

Asimismo, se utilizó goma de tara obtenida de la empresa PoliFood Perú S.A.C. (Perú) (Anexo 2).

3.3. EQUIPOS, MATERIALES Y REACTIVOS

3.3.1. EQUIPOS

- Balanza analítica (OHAUS Corporation, China)
- Agitador magnético (Heidolph, MR Hei-Tec, Alemania)
- Homogeneizador dispersador Ultra-Turrax (IKA, T 25D, Alemania)
- Lavador ultrasónico (VWR, Symphony ^{TM}, China)
- Balanza de precisión (A&D Company, Japón)
- Estufa con circulación de aire forzado (MMM Group, Venticell, Alemania)
- Micrómetro digital (MITUTOYO CORPORATION, Japón)
- Texturómetro (INSTRON, 3365, USA)
- Estufa con circulación de aire forzado (MMM Group, Venticell Ecoline, Alemania)
- Incubadora de laboratorio con agitación (MRC, TOU-120, Reino Unido)
- Espectrofotómetro (Thermo Scientific™, Genesys 10S UV-Vis, Estados Unidos)
- Colorímetro digital (Konica Minolta, CR-400, Japón)

3.3.2. MATERIALES

- Materiales de vidrio diversos (beakers, matraz Erlenmeyer, probetas, placas Petri)
- Placas Petri de plástico de 14 cm de diámetro para el casting de las películas
- Mesa de acero inoxidable
- Campana con solución saturada de bromuro de sodio a una humedad relativa de 58%
- Campana con agua destilada
- Campana con silicagel
- Jeringa de plástico de 50 mL y pipeta Pasteur
- Papel aluminio y Parafilm
- Hoja de bisturí, pinzas de metal y magnetos
- Base de corte tamaño A4 (Olfa CM-A4)
- Tijeras, regla y cucharas
- Cronómetro y termómetro
- Soporte Universal

- Calculadora
- Celda de permeación con silicagel

3.3.3. REACTIVOS

- Bromuro de sodio
- Glicerol (Sigma-Aldrich, USA)
- Agua destilada (~ pH = 7)

3.4. MÉTODOS DE ANÁLISIS

3.4.1. PROPIEDADES FÍSICAS

a. ESPESOR

La medición del espesor de la película se determinó en cinco puntos aleatorios mediante el uso de un micrómetro digital.

b. PORCENTAJE DE HUMEDAD

El contenido de humedad se determinó gravimétricamente mediante secado en estufa a 105°C durante 24 h (Gontard et al., 1992). Las mediciones fueron realizadas por triplicado.

c. SOLUBILIDAD EN AGUA Y GRADO DE HINCHAMIENTO

La solubilidad en agua se calculó en base al porcentaje de materia seca solubilizada después de 24 h de inmersión en agua destilada (Gontard et al., 1992) y el grado de hinchamiento se calculó en base al porcentaje de agua absorbida después de 24 h de inmersión en agua destilada. Para la determinación del porcentaje de solubilidad en agua y el grado de hinchamiento, se cortaron discos (2 cm de diámetro) de película, se pesaron y se determinó el peso de la materia seca inicial (P_i) mediante una estufa de secado a 105°C durante 24 h.

Después del secado se sumergieron las muestras en 50 mL de agua destilada y se sometió a una agitación mecánica a 50 RPM durante 24 h. Las muestras de la solución fueron removidas, filtradas y pesadas (P_o). Posteriormente, para determinar la solubilidad en agua, las muestras que no fueron solubilizadas se sometieron a un secado a 105°C durante 24 h (P_f). Las mediciones fueron realizadas por triplicado. La solubilidad en agua (S) de las películas se determinó de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$S(\%) = \left(\frac{P_i - P_f}{P_i}\right) x\ 100\%$$

Donde, P_i es el peso de la materia seca inicial (g) y P_f es el peso de la materia seca final después de la inmersión en agua destilada por 24 h (g).

La determinación del grado de hinchamiento (GH) se calculó de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$GH(\%) = \left(\frac{P_o - P_i}{P_i}\right) x\ 100\%$$

Donde, P_i es el peso de la materia seca inicial (g) y P_o es el peso de la materia después de 24 h de inmersión en agua destilada (g).

3.4.2. PROPIEDADES ÓPTICAS

a. COLOR

El color de las películas se determinó utilizando el colorímetro obteniendo los parámetros L*(luminosidad), a*(rojo-verde) y b*(amarillo-azul) de la escala CIELAB en condiciones de iluminación constantes. Los valores patrones fueron $L_0^* = 96.88$, $a_0^* = 0.13$ y $b_0^* = 2.32$. Estos valores se determinaron realizando la medición de la placa de calibrado blanco. Se utilizaron las siguientes ecuaciones para determinar la diferencia total de color (ΔE^*) respecto al patrón, índice de amarillez (YI) e índice de blancura (WI), respectivamente (Nandi & Guha, 2018). Las mediciones se realizaron por triplicado.

$$\Delta E^* = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2}$$

$$YI = \frac{142.86 b^*}{L^*}$$

$$WI = 100 - \sqrt{(100 - L^*)^2 + (a^*)^2 + (b^*)^2}$$

La diferencia total de color (ΔE^*) se utiliza generalmente para reconocer la diferencia entre dos colores según la siguiente escala: ΔE^*=0-0.5 (diferencia mínima), ΔE^*=0.5-1.5 (diferencia leve), ΔE^*=1.5-3.0 (diferencia notable), ΔE^*=3.0-6.0 (diferencia apreciable), ΔE^*=6.0-12.0 (diferencia grande) y ΔE^*>12.0 (diferencia muy evidente) (Goyeneche et al., 2014).

A continuación de detalla el procedimiento que se utilizó para realizar la medición del color en las películas:

Primero, se procedió a cortar la película en círculos con un diámetro aproximado de 2.5 cm. Luego, para llevar a cabo la medición de color, se instaló el colorímetro en posición vertical utilizando el soporte vertical para la sujeción del equipo. La placa de calibrado blanco se utilizó para la medida de los valores de los patrones. A continuación, se colocó la película, orientada por el lado opaco, en el área de medición, donde se procedió a la lectura y se registraron los parámetros de color (L*, a* y b*). La medición se realizó por triplicado. Finalmente, se llevó a cabo el cálculo de ΔE*, YI y WI, conforme a las ecuaciones previamente establecidas.

b. TRANSMISIÓN DE LUZ Y TRANSPARENCIA

La transmisión de luz UV-visible de los films fue determinada de acuerdo con la metodología propuesta por Sukhija et al. (2016). Cada película fue cortada en un rectángulo y colocada directamente en la celda del espectrofotómetro. Las mediciones fueron realizadas tomando al aire como referencia. Se determinó la transmitancia de cada película en el rango

de longitud de onda de 250 a 800 nm con intervalos de 2 nm y se calculó el valor de transparencia a 600 nm de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$T = \frac{-logT_{600}}{x}$$

Donde *T* es la transparencia (A.mm^{-1}), T_{600} es el valor transmitancia en decimales y *x* es el espesor del film (mm) (Han & Floros, 1997).

3.4.3. PROPIEDADES MECÁNICAS

Las propiedades mecánicas se determinaron de acuerdo el método estándar ASTM D882-12 (ASTM, 2012) con ligeras modificaciones propuestas por Assis et al. (2017). Se utilizó un analizador de textura con una celda de carga de 100 N. Las películas fueron cortadas en tiras (70 mm x 15 mm) y cada tira fue montada entre las mandíbulas del equipo para el análisis con una separación inicial de 50 mm y una velocidad de 10 mm/min. Se analizaron 15 tiras de cada formulación y se determinó la fuerza de tracción (FT) y el alargamiento a la rotura (AR**)**.

3.4.4. PERMEABILIDAD AL VAPOR DE AGUA (PVA)

La PVA se determinó mediante el método desecante que consiste en un análisis gravimétrico en función al tiempo y bajo condiciones de temperatura y humedad relativa controladas. Se utilizó el método estándar ASTM E96-80, conocido como el método de la copa o celda de prueba (Zamudio-Flores & Bello-Pérez, 2013).

Primero, se procedió a cortar las películas en forma circular, y simultáneamente se preparó el silicagel a utilizar (se activó y se colocó en la estufa). El análisis se realizó de acuerdo con el siguiente procedimiento: se registró el peso inicial de la celda, incluyendo la tapa y los cauchos selladores; se añadieron 20 g de silicagel a la celda, generando así una humedad relativa cercana al 0% en su interior; se colocó la película en la parte superior de la celda, asegurando la hermeticidad con los cauchos selladores; se colocó la tapa y se registró el peso

total del sistema. Finalmente, cada celda se colocó en una campana con agua destilada, manteniendo una humedad relativa constante del 100%.

Los cambios en el peso de las celdas se registraron cada hora durante 6 h. Se realizaron análisis de regresión lineal con los datos registrados de la ganancia de peso en función del tiempo, de donde se obtuvo la pendiente de la regresión lineal (g/s). En todos los casos se obtuvo coeficientes de regresiones mayores o iguales a 0.90. Todas las pruebas se realizaron a 25°C y por triplicado para cada formulación de película.

La permeabilidad al vapor de agua (PVA) se determinó de acuerdo con la siguiente ecuación

$$PVA = \frac{w}{t} * \frac{L}{A * \Delta p}$$

Donde, es la pendiente de la regresión lineal de la ganancia de masa en función al tiempo (g/s), L es el espesor promedio de cada película (m), A es el área de la celda de permeación (para cada celda es de 0.00317 m^2), Δp es la diferencia de presión de vapor de agua entre los dos lados de la película (Pa).

La Δp se puede obtener de la siguiente forma:

$$\Delta p = (p_{A2} - p_{A1}) = S(R_1 - R_2)$$

Donde, p_{A2} es la presión de vapor de agua en la campana con agua destilada (Pa), p_{A1} es la presión de vapor de agua a la cual está sujeta la película dentro de la celda (Pa), S es la presión de vapor de saturación a la temperatura experimental (Pa), R_1 es la humedad relativa en la campana con agua destilada (en fracción), R_2es la humedad relativa interna en la celda de permeación (en fracción) (Carballo & Martínez, 2010).

3.4.5. DESINTEGRACIÓN EN COMPOST

La evaluación del grado de desintegración del material plástico en condiciones simuladas de compostaje en laboratorio, bajo condiciones aeróbicas, se llevó a cabo siguiendo la metodología propuesta por Bonilla & Sobral (2020) con ligeras modificaciones y conforme a lo señalado en la norma ISO 20200 (2023).

A continuación, se detalla el procedimiento que se utilizó para realizar el ensayo de desintegración en compost:

Se utilizaron contenedores de tecnopor de 30 cm x 30 cm con una profundidad de 20 cm, con pequeños orificios para facilitar la transferencia de gas entre la atmósfera interna y externa. Las películas se cortaron en círculos de 1.5 cm de diámetro y se dispusieron en mallas metálicas individuales con aberturas de 2 mm. Posteriormente, las muestras fueron secadas en la estufa a 105°C durante 24 horas. Cada malla se identificó con el nombre de la formulación de la película. A continuación, los contenedores de tecnopor se llenaron por completo con compost del Centro Modelo de Tratamiento de Residuos (CEMTAR) de la UNALM, permitiendo la aireación a través de los agujeros en el tecnopor para favorecer el intercambio de aire. Después, las películas se enterraron a 7 cm de profundidad, colocando hasta veinte mallas por contenedor con un espacio de 2 cm entre ellas. Los recipientes de tecnopor se acondicionaron a temperatura ambiente y al 50% de humedad durante cinco días, se añadió agua periódicamente para mantener las condiciones adecuadas de humedad (aproximadamente 50%). Al quinto día, las películas se desenterraron, se lavaron con agua destilada para eliminar las partículas de compost y se secaron en estufa a 105°C durante 24 horas. La desintegración en compost se calculó mediante la diferencia de peso de las muestras (antes de ser colocadas en el compost y después de cinco días de compostaje), a continuación, se detalla la ecuación utilizada:

$$Desintegración(\%) = \left(\frac{P_i - P_f}{P_i}\right) x\ 100\%$$

Donde, P_i es el peso de la materia seca inicial antes de ser colocada en el compost (g) y P_f es el peso de la materia seca final después de cinco días de compostaje (g).

3.4.6. PROPIEDADES MORFOLÓGICAS Y ESTRUCTURALES

a. ESPECTRÓMETRO INFRARROJO CON TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR)

Los espectros FTIR se adquirieron en el rango de 650 a 4000 cm^{-1} en modo de reflexión total atenuada con una resolución de 4 cm^{-1} utilizando un espectrómetro FTIR (Shimadzu Instrument Co. Ltd., Japón (Xiaoqing et al., 2021).

b. MICROSCOPÍA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM)

Las muestras de película se mantuvieron en una campana con silicagel durante cinco días para asegurar que no haya presencia de agua en la muestra. Para observar la sección transversal, las películas se congelaron en N_2 líquido y se fracturaron mediante criofracturación (Espinel Villacrés et al., 2014). Las muestras de película se fijaron en trozos de aluminio mediante una cinta conductora de doble cara, recubierta con una fina capa de oro de acuerdo con lo sugerido por Iahnke et al. (2015). Se realizó la observación de la microestructura de las secciones transversales y de las superficies de las películas mediante un microscopio electrónico de barrido (JEOL, JSM 6060, Japón) con un voltaje de aceleración de 5 kV y un aumento de 1000x según lo recomendado por Assis et al., (2017), y un voltaje de aceleración de 20 kV y un aumento de 1500x y 2000x.

3.5. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Las películas biodegradables de la mezcla almidón y goma de tara se prepararon modificando la metodología de Assis et al. (2017). Las dispersiones de almidón, goma de tara y glicerol se hidrataron con agua destilada durante 19-20 h a temperatura ambiente. La mezcla se gelatinizó en un baño de agua maría a 90°C durante 30 min a una velocidad de agitación de 500 RPM. Posteriormente, la suspensión se enfrío hasta 45°C. Se realizó la homogenización de la suspensión en un Ultra-Turrax a una velocidad de 10000 RPM durante 2 min, seguida de 12000 RPM durante 2 min y 15000 RPM durante 1 min. La suspensión se sometió a un proceso de sonicación en un equipo de ultrasonido a 55°C durante 30 min con

el objetivo de eliminar las burbujas de aire formadas durante el proceso de homogeneización. Finalmente, se vertió 35 g de la solución formadora de película en placas Petri (14 cm de diámetro) y se colocó en una estufa de secado de convección forzada a 35°C durante 20 h. Posteriormente, se almacenaron las placas durante 5 días en un desecador con una solución saturada de bromuro de sodio (NaBr) para garantizar una humedad relativa (HR) de 58%. Las películas obtenidas fueron caracterizadas en base a los métodos de análisis del acápite 3.4.

El acondicionamiento de las películas se realiza a una humedad relativa (HR) del 58%, ya que este nivel ofrece un equilibrio en las propiedades mecánicas y de barrera de las películas. Según investigaciones previas, una HR más alta tiende a reducir la fuerza de tracción y aumentar tanto el alargamiento a la rotura como la permeabilidad al vapor de agua. Por otro lado, una HR más baja incrementa la fuerza de tracción y reduce la permeabilidad al vapor de agua, pero a costa de disminuir el alargamiento a la rotura (Chen et al., 2014; Alvarado et al., 2015),

Las dispersiones fueron elaboradas con las siguientes concentraciones:

• Concentración de polímeros: 4 g/100 g suspensión
• Concentración de glicerol: 25g/100g de polímeros

3.6. DISEÑO EXPERIMENTAL

Para establecer las concentraciones de los diferentes polímeros en la formulación de las películas se planteó un diseño de mezclas simplex de dos componentes (almidón y goma de tara), ambos entre 0 y 100 como se muestra en la Tabla 2. Se realizaron dos mezclas utilizando el almidón de papa de Ocucuri negra y goma de tara, y el almidón de tunta de Ocucuri negra y goma de tara.

El análisis de los resultados se realizó mediante un análisis de regresión múltiple y las mejores formulaciones se determinaron por optimización. Para cada formulación se tuvo en cuenta una concentración estándar de mezcla de biopolímeros (almidón + goma de tara) de

4.0 g/100 g de suspensión y una concentración constante de glicerol de 25 g/100 g de mezcla de polímeros. Cada formulación se realizó por duplicado.

Se seleccionó una formulación óptima para cada mezcla en base a las mejores respuestas de las variables evaluadas (propiedades mecánicas y permeabilidad al vapor de agua), con el objetivo de maximizar la fuerza de tracción (FT), mantener en un rango aceptable el alargamiento a la rotura (AR) y minimizar la permeabilidad al vapor de agua (PVA). Posteriormente, se elaboraron y caracterizaron las propiedades fisicoquímicas, mecánicas, ópticas, de barrera, de desintegración y estructurales de las películas óptimas producidas con estas formulaciones.

Tabla 2: Proporción (en porcentaje) de almidón: goma de tara en base a 4 g y concentración de glicerol (g/g de polímeros)

Almidón (%)	Goma de tara (%)	Glicerol (%)
100	0	0.25
97.5	2.5	0.25
95	5	0.25
92.5	7.5	0.25
90	10	0.25

En la Tabla 3 se presenta el esquema experimental el cual contempló dos etapas. La primera etapa consistió en la optimización y elaboración de las mezclas de almidón de papa o tunta de la variedad Ocucuri negra con la goma de tara en las proporciones descritas en la Tabla 2. En la segunda etapa se realizó la caracterización de las películas óptimas de cada mezcla.

Tabla 3: Esquema experimental

ETAPA	Etapa I: OPTIMIZACIÓN Y ELABORACIÓN DE PELÍCULAS A BASE DE ALMIDÓN Y GOMA DE TARA	Etapa II: CARACTERIZACIÓN DE LAS PELÍCULAS ÓPTIMAS
TRATAMIENTOS	- Mezcla almidón de papa y goma de tara (AP-GT) - Mezcla almidón de tunta y goma de tara (AT-GT) En proporción, A:GT (100:0, 97.5:2.5, 95:5, 92.5:7.5, 90:10)	- Formulación óptima de la mezcla AP-GT - Formulación óptima de la mezcla AT-GT
ANÁLISIS	**Evaluación de variables respuestas:** Propiedades mecánicas (alargamiento a la rotura (AR) y fuerza de tracción (FT)) y permeabilidad al vapor de agua (PVA) **Optimización:** maximizar la fuerza de tracción (FT), mantener en un rango aceptable el alargamiento a la rotura (AR) y minimizar la permeabilidad al vapor de agua (PVA)	- Humedad, solubilidad en agua (SA), grado de hinchamiento (GH) - Transmisión de luz y transparencia - Color (L*, a*, b*, diferencia total de color (ΔE*), índice de amarillez (YI, por su sigla en inglés) y índice de blancura (WI, por su sigla en inglés)) - Propiedades mecánicas (Alargamiento a la rotura (AR) y fuerza de tracción (FT) - Permeabilidad al vapor de agua (PVA) - Desintegración - Propiedades morfológicas (FTIR) y estructurales (SEM)

3.7. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Para la evaluación del efecto de los componentes de la película sobre las variables respuesta (fuerza de tracción, alargamiento a la rotura y permeabilidad al vapor de agua) (Etapa 1), se empleó el software Design Expert cuyo objetivo fue determinar el modelo matemático de mejor ajuste de los resultados experimentales. Asimismo, se realizó la validación de las formulaciones óptimas.

En la segunda etapa, se realizó la caracterización de las películas mediante un análisis de varianza de una vía (one way ANOVA) con un nivel de significancia del 5% ($\alpha = 0.05$). En caso de que el ANOVA sea significativo ($p < 0.05$) se realizó un análisis de comparación con la prueba de Tukey. Para este análisis se empleó el programa estadístico Statgraphics Centurion.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. DEFINICIÓN DE CONDICIONES ÓPTIMAS DE PROCESO PARA LAS PELÍCULAS

Se investigó la influencia de las variables: almidón de papa o tunta de la variedad nativa Ocucuri negra y goma de tara en los parámetros fuerza de tracción (FT), alargamiento a la rotura (AR**)** y permeabilidad al vapor de agua mediante un análisis de regresión múltiple. El diseño de mezclas simplex y los datos de las variables dependientes observadas para las mezclas de AP-GT y AT-GT se resumen en la Tabla 4 y Tabla 5.

Tabla 4: Diseño de mezclas simplex de la mezcla AP-GT con variables de proceso (no codificadas) y respuestas observadas

Corrida	Almidón de papa (%)	Goma de tara (%)	FT (MPa)	AR (%)	PVA (10^{-11} gm^{-1}s^{-1} Pa^{-1})
1	**100**	**0**	4.90	14.73	6.72
2	**100**	**0**	4.59	10.61	6.42
3	**97.5**	**2.5**	4.13	25.25	6.51
4	**97.5**	**2.5**	4.16	31.99	6.31
5	**95**	**5**	4.17	38.62	5.78
6	**95**	**5**	3.89	39.12	5.91
7	**92.5**	**7.5**	3.63	36.02	6.83

«continuación»

8	**92.5**	**7.5**	3.22	37.23	6.25
9	**90**	**10**	3.71	49.87	7.48
10	**90**	**10**	3.90	39.31	7.58

AP: Almidón de papa; GT: Goma de tara.; AR: Alargamiento a la rotura; FT: Fuerza de tracción; PVA: Permeabilidad al vapor de agua. Los valores mostrados en la presente tabla son valores medios.

Tabla 5: Diseño simplex de la mezcla AT-GT con variables de proceso (no codificadas) y respuestas observadas

Corrida	**Almidón de tunta (%)**	**Goma de tara (%)**	**FT (MPa)**	**AR (%)**	**PVA (10^{-11}gm^{-1}s^{-1} Pa^{-1})**
1	**100**	**0**	6.31	19.65	6.49
2	**100**	**0**	5.03	20.60	6.32
3	**97.5**	**2.5**	6.76	17.74	6.59
4	**97.5**	**2.5**	6.40	16.83	7.12
5	**95**	**5**	4.66	16.55	7.00
6	**95**	**5**	6.90	14.16	6.39
7	**92.5**	**7.5**	6.63	11.01	5.97
8	**92.5**	**7.5**	7.9	13.39	5.75
9	**90**	**10**	9.04	9.30	5.24
10	**90**	**10**	9.91	9.48	5.46

AT: Almidón de tunta; GT: Goma de tara.; AR: Alargamiento a la rotura; FT: Fuerza de tracción; PVA: Permeabilidad al vapor de agua. Los valores mostrados en la presente tabla son valores medios.

En la Tabla 6, se observa los modelos predictivos que detallan el efecto del almidón de papa o tunta y la goma de tara sobre las propiedades mecánicas y de barrera (fuerza de tracción, alargamiento a la rotura y permeabilidad al vapor de agua).

Tabla 6: Modelos predictivos sobre las propiedades mecánicas y de barrera de la mezcla AP-GT y AT-GT

Mezcla AP-GT	
Respuestas	**Modelos Predictivos**
Fuerza de tracción (MPa)	FT = +4.76 A +3.72 B -1.68 AB
Alargamiento a la rotura (%)	AR = +13.84 A +42.58 B +32.53 AB
Permeabilidad al vapor de agua ($x10^{-11}$ $gm^{-1}s^{-1}$ Pa^{-1})	PVA = +6.68 A +7.50 B -4.07AB
Mezcla AT-GT	
Respuestas	**Modelos Predictivos**
Fuerza de tracción (MPa)	FT = +5.99 A +9.31 B -5.58 AB
Alargamiento a la rotura (%)	AR = +20.02 A +9.39 B +1.33 AB
Permeabilidad al vapor de agua ($x10^{-11}$ $gm^{-1}s^{-1}$ Pa^{-1})	PVA = +6.48 A +5.24 B +2.97 AB

A: Almidón (proporción en decimales); B: Goma de tara (proporción en decimales); AR: Alargamiento a la rotura; FT: Fuerza de tracción; PVA: Permeabilidad al vapor de agua

Para la fuerza de tracción (FT) en la mezcla AP-GT, se observa que el término lineal de AP y GT influyeron positivamente en la FT. Por otro lado, la interacción APxGT tuvo un impacto negativo en este parámetro. El ANOVA de la regresión resulto significativo ($p<0.05$) (Tabla 7) y el valor de coeficiente de determinación ($R^2 = 0.8015$) denota que el modelo desarrollado explica el 80% de las variaciones de la FT (Tabla 7). El mismo

comportamiento se observa para la mezcla AT-GT, donde solo el término lineal de AT y GT, influyen positivamente en la FT, con un valor de coeficiente de determinación (R^2) de 0.7210.

En el caso del alargamiento a la rotura (AR), para mezcla AP-GT, se observa que el término lineal de AP, término lineal GT y la interacción APxGT influyeron positivamente en el alargamiento a la rotura. El ANOVA de la regresión resulto significativo ($p<0.05$) (Tabla 7) y el valor del coeficiente de determinación (R^2) de 0.8755 denota que el modelo desarrollado explica el 87.6% de las variaciones del AR (Tabla 7). Para la mezcla AT-GT, el término lineal de AT y GT, y la interacción ATxGT influyeron positivamente en el AR, con un valor de coeficiente de determinación (R^2) de 0.9526.

Para la permeabilidad al vapor de agua (PVA), en la mezcla AP-GT, el término lineal de AP y GT influyeron positivamente en la PVA. Por otro lado, la interacción APxGT tuvo un impacto negativo en esta propiedad. El ANOVA de la regresión resulto significativo ($p<0.05$) (Tabla 7) y el valor del coeficiente de determinación (R^2) de 0.8302 denota que el modelo desarrollado explica el 83% de las variaciones de la PVA (Tabla 7). Mientras que, en la mezcla AT-GT, el término lineal de AT y GT, y la interacción ATxGT influyeron positivamente en la PVA, con un valor de coeficiente de determinación (R^2) de 0.8289 (Tabla 8).

En resumen, en la Tabla 7 y Tabla 8 se muestran los datos de análisis de varianza (ANOVA) y las medidas de bondad de ajuste para las mezclas de AP-GT y AT-GT, respectivamente. En la Figura 14 se muestran las películas desarrolladas en mezclas de almidón de papa-goma de tara y almidón de tunta-goma de tara en las diferentes proporciones señaladas en el diseño experimental (acápite 3.6).

Tabla 7: Resumen estadístico del análisis de varianza (ANOVA) y bondad de ajuste sobre las propiedades mecánicas y de barrera de las películas de la mezcla AP-GT

Variables dependientes	ANOVA				Bondad de ajuste	
	Modelo	Términos lineales de mezcla	AB	Falta de ajuste	CV (%)	R^2
Fuerza de tracción (FT)	14.13 (0.0035)	23.01 (0.0020)	5.25 (0.0556)	2.92 (0.1447)	6.01	0.8015
Alargamiento a la rotura (AR)	24.61 (0.0007)	44.25 (0.0003)	4.96 (0.0612)	2.15 (0.2120)	14.97	0.8755
Permeabilidad al vapor de agua (PVA)	17.11 (0.0020)	10.85 (0.0132)	23.37 (0.0019)	3.00 (0.1395)	4.23	0.8302

F-test y el p-valor (entre paréntesis, Prob >F) del modelo completo, términos de mezcla lineal, términos de interacción y falta de ajuste de modelos polinomiales ajustados; datos de medidas de bondad de ajuste que incluyen coeficiente de variación (CV) y coeficiente de determinación (R^2).

Tabla 8: Resumen estadístico del análisis de varianza (ANOVA) y bondad de ajuste sobre las propiedades mecánicas y de barrera de las películas de la mezcla AT-GT

Variables dependientes	ANOVA				Bondad de ajuste	
	Modelo	Términos lineales de mezcla	AB	Falta de ajuste	CV (%)	R^2
Fuerza de tracción (FT)	9.04 (0.0115)	14.50 (0.0067)	3.59 (0.0999)	1.13 (0.3939)	14.01	0.7210
Alargamiento a la rotura (AR)	70.35 (<0.0001)	140.52 (<0.0001)	0.1932 (0.6735)	0.1735 (0.8455)	6.74	0.9526
Permeabilidad al vapor de agua (PVA)	16.96 (0.0021)	22.62 (0.0021)	11.29 (0.0121)	1.33 (0.3441)	4.68	0.8289

F-test y el p-valor (entre paréntesis, Prob >F) del modelo completo, términos de mezcla lineal, términos de interacción y falta de ajuste de modelos polinomiales ajustados; datos de medidas de bondad de ajuste que incluyen coeficiente de variación (CV) y coeficiente de determinación (R^2).

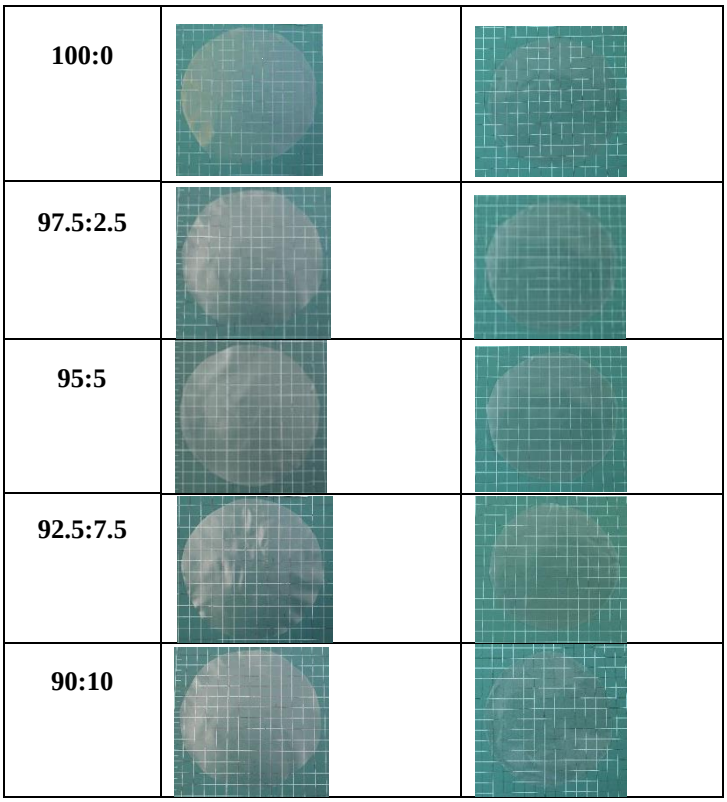


Figura 14: Películas desarrolladas en mezclas de almidón de papa-goma de tara y almidón de tunta-goma de tara en diferentes proporciones

4.1.1. EFECTO DE LAS VARIABLES INDEPENDIENTES SOBRE LA FUERZA DE TRACCIÓN (FT)

El efecto del almidón y goma de tara sobre la fuerza de tracción se muestra en el gráfico de mezcla de dos componentes de la Figura 15 y Figura 16 para la mezcla AP-GT y la mezcla AT-GT, respectivamente. La FT aumentó de forma constante al aumentar la goma tara, lo que indica la influencia reforzadora de la goma de tara en las películas de AT-GT (Figura 16). Este fenómeno está relacionado con la distribución y la cantidad de asociaciones inter e intramoleculares (Saberi et al., 2016). El comportamiento contrario se evidenció en las películas elaboradas a partir de almidón de papa y goma de tara (Figura 15).

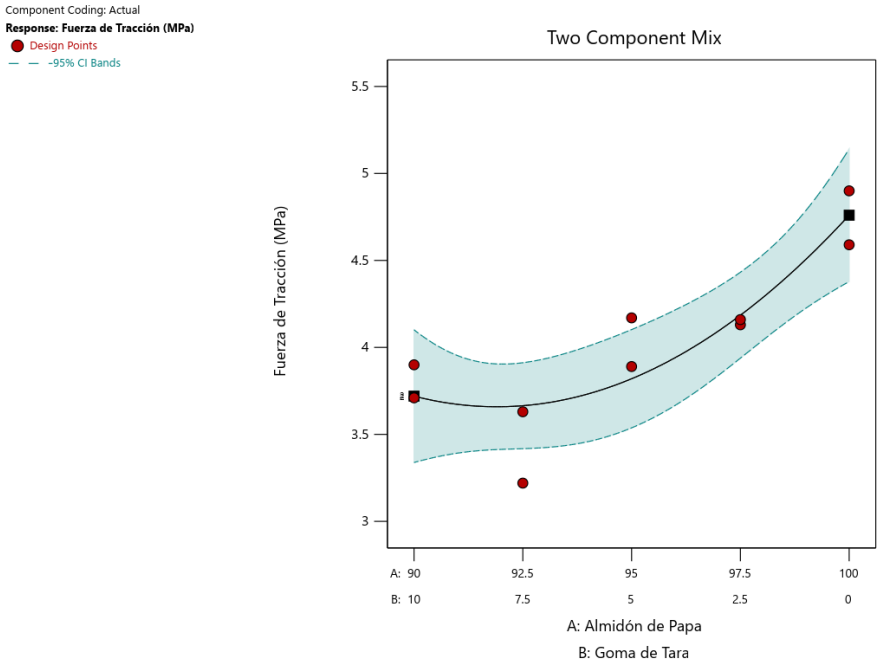


Figura 15: Interacción del AP y GT en la fuerza de tracción

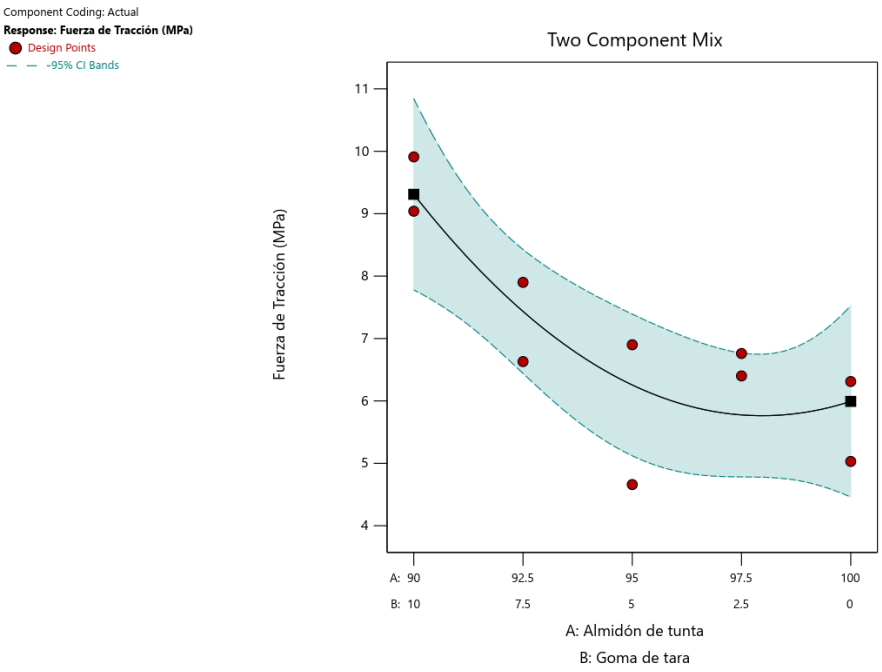


Figura 16: Interacción del AT y GT en la fuerza de tracción

Durante el proceso de gelatinización, las estructuras organizadas de las moléculas de almidón se destruyen, provocando la exposición de los grupos OH para formar fácilmente enlaces de hidrógeno con la goma tara debido a la similitud química de ambos polisacáridos

(Saberi et al., 2016). En diversas investigaciones se señala que la adición de gomas a películas de almidón favorece el aumento de la FT (De Morais Lima et al., 2017; Melo et al., 2011; Nandi & Guha, 2018; Nawab et al., 2016). Este efecto de la interacción entre la amilosa lixiviada y las moléculas de amilopectina del almidón y el grupo OH de las gomas (Thakur et al., 2019) descrito por los autores anteriormente señalados se refleja en las películas de AT-GT, donde posiblemente el desarrollo de enlaces de hidrógeno intermoleculares entre la AT y el GT genera una estructura resistente de las películas favoreciendo la fuerza de tracción, pero con menor deformabilidad (como se detallará en el acápite 4.1.2.) (Nawab et al., 2017; Saberi et al., 2016; Sapper et al., 2019). Asimismo, Melo et al. (2011) señalan que la interacción almidón y goma posiblemente previene y dificulta la interacción amilosa-amilosa, lo que evita la agregación y baja dispersión del almidón. Lo anteriormente mencionado puede ser observado en la Figura 16, en la interacción del AT y GT en la fuerza de tracción.

Existe un comportamiento contrario en la mezcla AP-GT, donde la adición de la GT disminuye el valor de FT (Figura 15). Kaur et al. (2008) investigaron el efecto de la interacción entre el almidón y goma cassia en el comportamiento reológico y viscoelástico del sistema almidón y goma; encontrando que el tipo de almidón, la concentración de amilosa y la distribución del tamaño de los gránulos son factores importantes que afectan a la extensión de las interacciones entre el almidón y la goma cassia, lo que puede dar lugar a un comportamiento funcional variado.

Posiblemente, en la mezcla AP-GT ocurren restricciones al hinchamiento del gránulo de almidón por parte de la goma de tara durante el proceso de gelatinización que dan lugar a la reducción del tamaño de los restos de gránulos de almidón (Kaur et al., 2008), y, por lo tanto, una reducción de la interacción del almidón con la goma de tara (lo que se refleja en su menor valor de FT), debido a la agregación/baja dispersión de las partículas de AP en la mezcla AP-GT (Du et al., 2019). Un comportamiento similar es señalado en mezclas de almidón de yuca y carragenina donde mediante un análisis SEM se observa que la carragenina se dispersa en el medio acuoso que contiene el almidón de yuca como una fina lámina, lo que sugirió que no hay una interacción entre estos dos polímeros (Leite et al., 2012).

La procedencia de los almidones muestra que en el caso del AP presenta contenido de amilosa aparente más alto (28.75 ± 0.44%) que el AT (23.13 ± 0.44%) debido a la disminución del contenido de amilosa durante la congelación-descongelación natural que ocurre durante el proceso de elaboración de tunta; mientras que el tamaño de partícula es de 38.43 ± 0.25µm y 36.27 ± 0.21µm, respectivamente (Cuba, 2022; Martínez et al., 2022). Por lo que podría atribuirse el diferente comportamiento de la interacción del AP y GT, al mayor contenido de amilosa del AP. Lo anteriormente mencionado, evidencia el comportamiento del AT como un posible material de refuerzo en mayor medida que el AP, ya que, este almidón presenta un mayor grado de entrecruzamiento con otros polímeros.

4.1.2. EFECTO DE LAS VARIABLES INDEPENDIENTES SOBRE EL ALARGAMIENTO A LA ROTURA (AR)

El efecto del almidón y goma de tara sobre el alargamiento a la rotura se muestra en el gráfico de mezcla de dos componentes de la Figura 17 y Figura 18 para la mezcla AP-GT y la mezcla AT-GT, respectivamente.

En los modelos predictivos mostrados en Tabla 6 para el AR se observa que el AT afecta positivamente en mayor medida que el AP. Asimismo, se observó que la goma de tara afecta positivamente el valor de alargamiento a la rotura en ambas mezclas (AP-GT y AT-GT) (Tabla 6). Este comportamiento también es reportado por Nandi & Guha (2018) que investigaron el efecto de la goma guar en películas de almidón de papa-goma guar proponiendo que la causa se debe a que el incremento de la concentración de goma genera una mayor absorción de agua, que actúa como plastificante, interrumpiendo los enlaces de hidrógeno entre las cadenas de almidón y goma de tara. Por lo que, la movilidad de la cadena aumentó, lo que aumentó el valor de alargamiento a la rotura de las películas. Otro posible factor que considerar es la partición de agua entre los dos polímeros, según su afinidad relativa por el agua, podría afectar el nivel de plastificación de la matriz de la mezcla, afectando su comportamiento mecánico (Sapper et al., 2019). La afinidad al agua de la goma de tara es considerablemente mayor al almidón de papa o tunta, ya que, como señalan Cuba (2021) y Martínez et al. (2022), la capacidad de absorción de agua a 90°C es de 22.40 ± 0.53 y 17.17 ± 0.39 para el almidón de papa y tunta de la variedad nativa Ocucuri negra,

respectivamente; y de 17.133%, para la goma de tara a temperatura ambiente (Karaman et al., 2014).

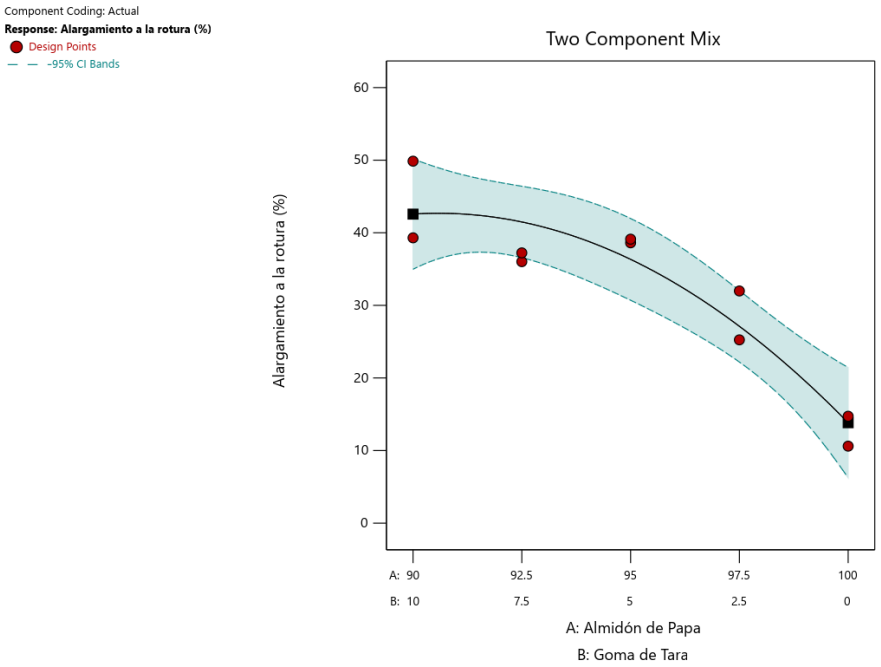


Figura 17: Interacción de la mezcla AP-GT en el alargamiento a la rotura

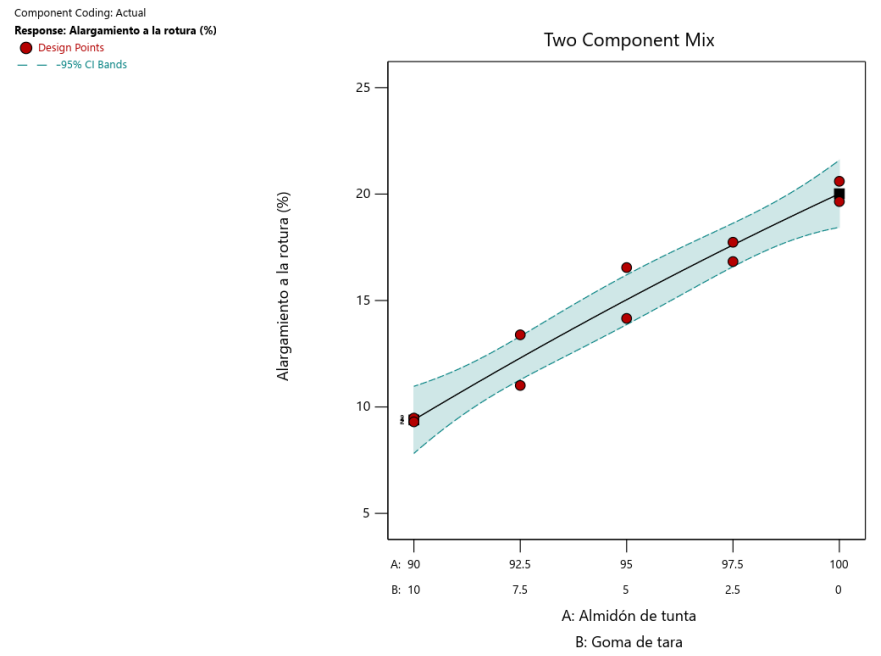


Figura 18: Interacción de la mezcla AT-GT en el alargamiento a la rotura

El efecto de la interacción de almidón y goma de tara tiene un impacto menor en el AR de la mezcla AT-GT que en la mezcla AP-GT (Tabla 6). Esto podría ser debido a la restricción generada por la unión de las cadenas poliméricas (AT y GT), que genera una red resistente al estiramiento comprometiendo el comportamiento dúctil de la película (Nawab et al., 2017; Sapper et al., 2019), lo que impide la formación de una matriz amilosa más densa, y en consecuencia una disminución de la alargamiento a la rotura, esto es debido a que las interacciones de la red amilosa-goma de tara son menos esteáricamente estables que las interacciones amilosa-amilosa (Melo et al., 2011). Asimismo, como se comentó en el acápite 4.4.1., el AP posiblemente interacciona en menor medida con la GT, lo que induce una agregación de las cadenas de este polímero, y, por ende, una baja dispersión de este en la matriz de la mezcla. Esto genera la formación de una estructura más abierta, con una gran movilidad molecular, y, en consecuencia, que la interacción del APxGT presente un mayor impacto en el alargamiento a la rotura (AR). Es decir, el material se vuelve más dúctil y con una gran capacidad de deformación.

4.1.3. EFECTO DE LAS VARIABLES INDEPENDIENTES SOBRE LA PERMEABILIDAD AL VAPOR DE AGUA (PVA)

El efecto del almidón y goma de tara sobre la permeabilidad al vapor de agua (PVA) se muestra en el gráfico de mezcla de dos componentes de la Figura 19 y Figura 20 para la mezcla AP-GT y la mezcla AT-GT, respectivamente.

De acuerdo con el modelo predictivo presentando en la Tabla 6 para la PVA, el componente goma de tara tiene un impacto positivo en el valor de PVA tanto para la mezcla AP-GT y la mezcla AT-GT. Esto es debido a la naturaleza altamente hidrofílica de la goma de tara que favorece la unión de las moléculas de agua con el lado activo de la cadena del polímero, creando así microcavidades. Asimismo, debido a la absorción de las moléculas de agua, la movilidad de la cadena polimérica aumenta a causa de la disminución de la integridad estructural, motivo por el cual, la tasa de difusión de agua aumenta a través de la película (Nandi & Guha, 2018). Lo anteriormente explicado también puede ser aplicado al almidón donde su naturaleza hidrofílica favorece el incremento de PVA.

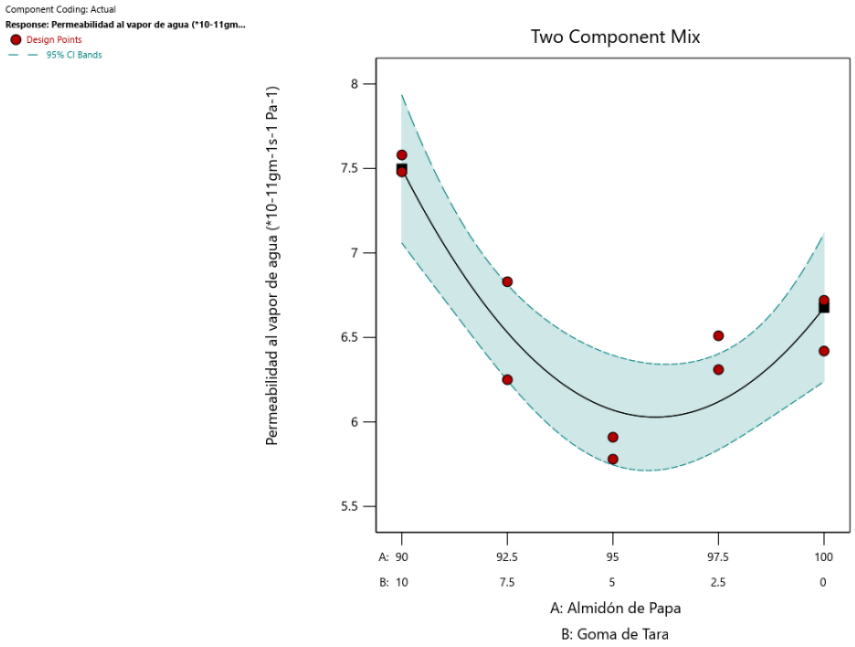


Figura 19: Interacción de la mezcla AP-GT en la PVA

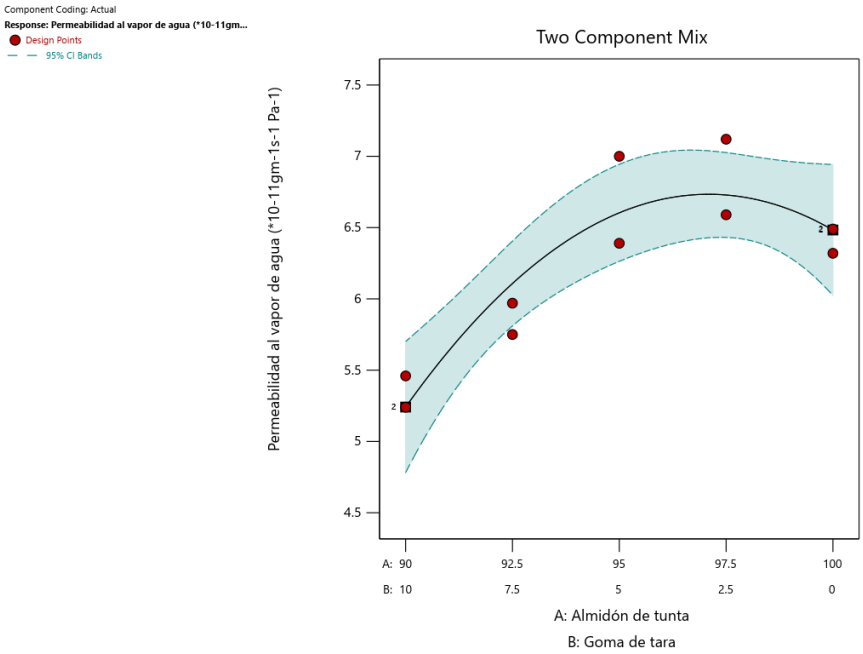


Figura 20: Interacción de la mezcla AT-GT en la PVA

Se esperaría que la interacción del almidón y la goma de tara conduzca a menores espacios libres en la matriz de la película, permitiendo que las moléculas de agua se difundan más difícilmente en la red de polisacáridos y por lo tanto disminuyendo la PVA (Antoniou et al.,

2015; Dick et al., 2015). Esto es corroborado en el modelo predictivo de la PVA para la mezcla AP-GT, donde el efecto de la interacción de APxGT disminuye el vapor de PVA.

En cambio, la interacción de ATxGT tiene un impacto positivo en el valor de PVA, este comportamiento es reportado por Saberi et al. (2016) que señalan que la interacción entre el almidón de guisante y la goma guar tiene un impacto positivo en el valor de PVA, donde la adición de estos componentes permite una absorción más libre de moléculas de agua en la superficie de las películas (mayor solubilidad) y, por lo tanto, penetrar más libremente a través de la estructura de la película (es decir mayor difusividad), aumentando la PVA. Asimismo, Gontard et al. (1994) indican que la transmisión de vapor de agua a través de una película hidrofílica depende de la velocidad de difusión y de la solubilidad de las moléculas de agua en la matriz de la película.

Autores como Saberi et al. (2016) reportan valores de PVA de 14.085×10^{-10} $gPa^{-1}s^{-1}m^{-1}$ en películas de almidón de guisante y goma guar; Nawab et al. (2017) señalan en películas de semilla de mango y goma guar, el valor de PVA se encuentra en el rango de $2.96\text{-}4.29\times10^{-10}$ $gPa^{-1}s^{-1}m^{-1}$; Nandi & Guha (2018) determinan un valor de $2.05\ x10^{-3}$ $gPa^{-1}s^{-1}m^{-1}$ en películas de almidón de papa y goma guar. Los valores de PVA de estos autores son menores a los reportados en la presente investigación, como se muestran en la Tabla 4 y Tabla 5, para la mezcla de AP-GT y AT-GT, el valor de PVA se encuentra en el rango de 5.78-7.58 y 5.24-7.12 ($x10^{-11}$ $gPa^{-1}s^{-1}m^{-1}$), respectivamente.

4.2. OPTIMIZACIÓN Y VALIDACIÓN DE PARÁMETROS DE PREPARACIÓN DE LAS PELÍCULAS

Se llevó a cabo una optimización numérica utilizando la metodología de superficie de respuesta para mejorar las concentraciones de almidón y goma de tara en la preparación de diversas películas. Esto permite ajustar las variables respuestas para lograr un equilibrio entre las propiedades mecánicas y de barrera de las películas. En este proceso, se aplicaron restricciones que se detallan en la Tabla 9 y Tabla 10, las cuales fueron determinadas con base en los resultados de las propiedades mecánicas y de barrera.

El objetivo primordial fue maximizar la fuerza de tracción (FT) como indicador de resistencia de la película, mantener dentro de un rango aceptable el alargamiento a la rotura (AR) y minimizar la permeabilidad al vapor de agua (PVA) para mejorar la eficiencia de barrera al vapor de agua de la película.

Tabla 9: Restricciones para las características de la película AP:GT óptima

Características evaluadas	**Límites**	
	Inferior	**Superior**
Goma de tara (%)	0	10
Almidón de papa (%)	90	100
FT (MPa)	3.22	4.90
AR (%)	10.61	49.87
PVA (10^{-11}gm^{-1}s^{-1} Pa^{-1})	5.78	7.58

Tabla 10: Restricciones para las características de la película AT:GT óptima

Características evaluadas	**Límites**	
	Inferior	**Superior**
Goma de tara (%)	0	10
Almidón tunta (%)	90	100
FT (MPa)	4.66	9.91
AR (%)	9.3	20.60
PVA (10^{-11}gm^{-1}s^{-1} Pa^{-1})	5.24	7.12

La optimización condujo a la identificación de dos soluciones para la formulación AP:GT y dos soluciones para la formulación AT:GT. Los resultados detallados de esta optimización se encuentran presentados en el Anexo 2.

Tras evaluar cuidadosamente las distintas opciones, se determinó que las fórmulas finales óptimas corresponden a la N°2 y N°1 (para AP:GT y AT:GT, respectivamente). Esta elección se basa en la capacidad de estas formulaciones para combinar valores destacados

en propiedades mecánicas y de barrera, alineados con los parámetros deseados durante el proceso de optimización.

Tabla 11: Condiciones determinadas en la optimización de la combinación de concentración de almidón y goma de tara de las películas

Película	Almidón (%)	Goma de tara (%)
AP-GT	100	0
AT-GT	90	10

Después de optimizar las condiciones del proceso, se procedió a la elaboración de las películas de AP-GT y AT-GT, previamente mencionadas, con el propósito de llevar a cabo su caracterización en términos de fuerza de tracción, alargamiento a la rotura y permeabilidad al vapor de agua. Los resultados obtenidos experimentalmente, presentados en la Tabla 12, son la validación de cada respuesta y revelan una cercanía media entre los valores experimentales y aquellos predichos por los modelos, evidenciando errores experimentales moderados. Por consiguiente, se considera que estos resultados demuestran la validez y adecuación de los modelos descritos en el apartado 6.3.1.

Tabla 12: Validación de condiciones óptimas de proceso para las películas comparando los valores experimentales con los predichos por los modelos para cada respuesta

Respuesta	Película AP:GT			Película AT:GT		
	Predicho	Experimental	Error (%)	Predicho	Experimental	Error (%)
Fuerza de tracción (MPa)	4.76	5.02 ± 0.46	5.18	9.31	10.65 ± 0.88	12.58
Alargamiento a la rotura (%)	13.84	15.38 ± 1.12	10.01	9.39	11.52 ± 1.02	18.49
Permeabilidad al vapor de agua ($x10^{-11}$ $gm^{-1}s^{-1}$ Pa^{-1})	6.68	7.26 ± 0.38	7.99	5.24	6.14 ± 0.64	14.66

AP: Almidón de papa, AT: Almidón de tunta y GT: Goma de tara. Los valores presentados en la presente tabla son los valores medios y desviaciones estándar.

4.3. CARACTERIZACIÓN DE LAS PELÍCULAS ÓPTIMAS

4.3.1. PROPIEDADES FISICOCOQUÍMICAS, ÓPTICAS, MECÁNICAS, DE BARRERA Y DE DESINTEGRACIÓN

Las aplicaciones específicas de las películas están definidas por características importantes de las mismas, las cuales son sus propiedades fisicoquímicas (humedad, solubilidad en agua, grado de hinchamiento), sus propiedades ópticas (color, transmisión de luz y transparencia), sus propiedades mecánicas (fuerza de tracción y alargamiento a la rotura), su propiedad barrera (permeabilidad al vapor de agua) y su desintegración en compost. Estas propiedades están determinadas por los componentes formadores de la película (Meritaine da Rocha et al., 2018). A continuación, en la Tabla 13, se muestra la caracterización de las películas óptimas desarrollas para la mezcla AP-GT y la mezcla AT-GT. Los análisis de estos resultados se encuentran presentados en el Anexo 3, 4, 5, 6 y 7.

Tabla 13: Caracterización parcial de las películas óptima de AP-GT y AT-GT

	AP-GT	**AT-GT**
Espesor (µm)	0.0729 ± 0.002^{a}	0.074 ± 0.004^{a}
Gramaje (g/m^2)	196.03 ± 11.13^{a}	201.22 ± 4.65^{a}
Densidad (g/cc)	2690.62 ± 152.80^{a}	2719.17 ± 62.84^{a}
Humedad (%)	17.71 ± 0.19^{b}	18.32 ± 0.10^{a}
Solubilidad en agua (%)	30.93 ± 1.73^{a}	23.42 ± 0.54^{b}
GH (%)	438.93 ± 13.68^{a}	344.70 ± 21.46^{b}
L*	96.42 ± 0.11^{a}	96.38 ± 0.11^{a}
a*	0.22 ± 0.01^{a}	0.21 ± 0.01^{a}

«continuación»

b*	2.83 ± 0.03^{a}	2.85 ± 0.03^{a}
ΔE*	0.70 ± 0.07^{a}	0.77 ± 0.07^{a}
YI	4.19 ± 0.05^{a}	4.23 ± 0.05^{a}
WI	95.43 ± 0.10^{a}	95.38 ± 0.10^{a}
FT (MPa)	5.02 ± 0.46^{b}	10.65 ± 0.88^{a}
AR (%)	15.38 ± 1.12^{a}	11.52 ± 0.68^{b}
PVA ($x10^{-11}$ $gm^{-1}s^{-1}$ Pa^{-1})	7.26 ± 0.38^{a}	6.14 ± 0.64^{a}
Desintegración en compost (%)	59.31 ± 2.84^{b}	69.07 ± 2.32^{a}

AP: Almidón de papa, AT: Almidón de tunta y GT: Goma de tara. Los valores presentados en esta tabla son los valores medios y desviaciones estándar. Las letras diferentes dentro de la misma columna son significativamente diferentes ($p < 0,05$) por la prueba Tukey.

Con respecto a la humedad, el alto o bajo contenido de este parámetro en la película nos indica como la interacción entre diferentes polímeros puede afectar la afinidad de las películas con el agua. Los resultados de humedad de las películas óptimas se encuentran en el rango entre 17.71-18.32 % (Tabla 13), el valor de humedad de las dos formulaciones óptimas presentó diferencias significativas ($p<0,05$).

Estos valores de humedad son mayores a los reportados por Nandi & Guha (2018), que señalan un valor de humedad de 10.01 ± 0.89 % (película de almidón de papa y goma guar); Singh et al. (2015), que en películas de quitosano determinaron un valor de humedad de 14.77 %; y Askari et al.(2018), que señalan valores de humedad en el rango de 7.06-10.87% en películas de almidón modificado y goma psyllium. Y menores a los señalados por Saberi et al. (2016), que reportan una humedad de 20.134 ± 1.482 % en películas de almidón de guisante y goma guar; y de Morais Lima et al. (2017), que señalan valores de humedad en el rango de 19.26-22.16% en películas de quitosano con goma xantana. La posible diferencia

entre autores puede ser debido a la diferente interacción entre los polímeros formadores de cada película y la concentración de estos, esto debido a que una alta formación de enlaces cruzados entre las cadenas de polímeros da como resultado, la disminución de la disponibilidad de grupos hidroxilo, lo que conlleva a interacciones reducidas entre los polímeros y las moléculas de agua a través de enlaces de hidrógeno (Kanmani & Lim, 2013; Martins et al., 2012).

Es importante resaltar que, la presencia de goma de tara genera una mayor afinidad de la película al agua, posiblemente debido un mayor entrelazamiento molecular y viscosidad que conduce a una mayor retención de moléculas de agua durante el secado de películas (Saberi et al., 2016; Singh et al., 2015). Es decir, la incorporación de goma de tara otorga una mayor hidrofilia a las películas porque las moléculas de agua son retenidas durante la etapa de secado.

Como señalan Singh et al. (2015), las películas de empaque deben mantener los niveles de humedad dentro del producto empaquetado. Es debido a esto que la medición de humedad es importante, ya que puede afectar la humedad relativa dentro del empaque, y, por ende, la vida útil del producto. La cantidad de agua presente en la película es un indicador de la hidrofobicidad de la película, y está directamente relacionada con la humedad (Bourbon et al., 2011).

Respecto a la solubilidad en agua (SA), esta propiedad está relacionada al contenido de grupos hidroxilo libres en la matriz polimérica que permitan el establecimiento de interacciones de hidrógeno entre la película y el agua (McHugh & Krochta, 1994 citado por Marvdashti et al., 2017). Esta propiedad es importante en aplicaciones de las películas como protección de alimentos con alta actividad de agua para evitar exudación de productos frescos o congelados durante el procesamiento y para mantener la integridad del alimento (Gontard et al., 1992; Sukhija et al., 2016). Dependiendo la aplicación que se le dé a la película puede que sea necesaria o no la resistencia al agua, por lo que la SA es un parámetro importante que debe ser controlado (Marvdashti et al., 2017).

Los resultados de SA de las películas óptimas oscilaron entre 23.42-30.93%, el valor de SA de las dos formulaciones óptimas presentó diferencias significativas ($p<0,05$) (Tabla 13).

Estos valores fueron mayores a los obtenidos por Nandi & Guha (2018), que señalan una SA de 23.2 ± 2.52 %, en películas de almidón de papa y goma guar. Mientras que, en películas de quitosano y goma xantana presenta una SA que oscila entre 21.59-22.58% (De Morais Lima et al., 2017). Otros autores reportan valores superiores a los obtenidos como Xiaoqing et al. (2021) que reportan valores mayores de SA, siendo de 43.64 ± 0.03% en una película elaborada con papa y gelatina, utilizando glicerol como plastificante; y de 70.72 ± 0.45% en película de gelatina y almidón de papa andina (*Solanum tuberosum Group Phureja)* (1:1) (Otálora et al., 2021).

Esta diferencia entre autores puede ser explicado posiblemente por la interacción del almidón con la GT, ocurre un aumento de la estructura compacta de las cadenas poliméricas, lo que genera menos espacios en la matriz polimérica, que conducen a una menor penetración de moléculas de agua, y por ende una menor solubilización de los componentes de la película (Otálora et al., 2021; Saberi et al., 2016; Wang et al., 2017). Esto explica el motivo por el cual la mezcla AT-GT presenta una menor solubilidad (23.42%) que la mezcla AP-GT (30.93%). Esto genera una mayor resistencia al agua, mejora de la cohesión de la matriz y disminuye la sensibilidad al agua debido a una menor cantidad de grupos hidroxilo libres para unir moléculas de agua (Tunc et al., 2007 citado por Ahmad et al., 2015).

Asimismo, Cuba (2021) señala que la capacidad de absorción de agua a 90°C es de 22.40 y 17.47 g/g en el almidón de papa y tunta Ocucuri Negra, respectivamente. Lo que favorecería la interacción AP-agua, y contribuyendo en mayor medida a la solubilidad de la película con respecto al AT. La SA está relacionada con la resistencia al agua, lo que a su vez se relaciona con la integridad de la película. Donde, un alto valor de SA, indica una alta desintegración y una baja resistencia al agua (Ahmad et al., 2015; Askari et al., 2018; Bourtoom & Chinnan, 2008; Marvdashti et al., 2017).

Con respecto al grado de hinchamiento (GH), se refiere a la capacidad de retención de agua de la película que está relacionada con los grupos hidrofílicos libres y el volumen libre en películas de mezcla (He et al., 2010). Los valores de capacidad de hinchamiento de las películas óptimas se presentan en la Tabla 13. Se observa que el GH de las películas de AT-GT fue significativamente menor que de las películas de AP-GT ($p < 0,05$). Esto indica que la interacción de AT-GT genera un mayor grado de entrecruzamiento, y por lo tanto un

menor volumen libre. Por lo que, existe un menor número de grupos hidroxilo disponibles para la interacción con el agua, lo que indica que la formulación óptima AT-GT posee una estructura más compacta (Li et al., 2013; Reddy & Yang, 2010; Suriyatem et al., 2018; Wu et al., 2019).

La incorporación de GT a las películas de AP o AT genera un entrecruzamiento entre estos dos polímeros, lo que disminuye la capacidad de retención de agua en función del grado de interacción intermolecular entre los polímeros constituyentes de la película y que está relacionado con el GH (Cortés-Rodríguez et al., 2020; Saberi et al., 2017; Seligra et al., 2016). Este comportamiento es señalado también por Cortés-Rodríguez et al. (2020) que indican que la incorporación de proteína de suero en películas de almidón de yuca disminuye el valor de GH; y por Saberi et al. (2017) que reportan el mismo comportamiento en películas de almidón de guisante-goma guar.

La capacidad de hinchamiento de las películas de mezcla depende de sus enlaces de hidrógeno y cristalinidad conjunta (He et al., 2010). De acuerdo con la procedencia de los almidones, el AT presenta un valor de cristalinidad ligeramente más alto (27.2%) que el AP (25.9%) (Martínez et al., 2022) y esta mayor cristalinidad del AT podría estar relacionada con una mayor cristalinidad de la película, lo conllevaría a menores espacios para mantener y contener moléculas de agua, que resulta en un menor valor de GH de la formulación óptima de AT-GT (He et al., 2010; Wang et al., 2017).

Asimismo, se observa que, en las formulaciones óptimas, la SA y GH poseen la misma tendencia, siendo la película óptima de AT-GT, la que presenta una menor SA y un menor GH. Lo que es explicado debido a la presencia de GT que favorece el entrecruzamiento con el almidón, lo que mejora la cohesión de la matriz y generando una mayor resistencia al agua (Nawab et al., 2016).

Los resultados de las propiedades ópticas relacionadas al color: los valores *de L*, a* y b*,* diferencia total de color (ΔE^*), índice de amarillez (*YI*) and índice de blancura (*WI*) para las formulaciones óptimas son presentados en la Tabla 13. En la Figura 21 se observa las películas desarrolladas.

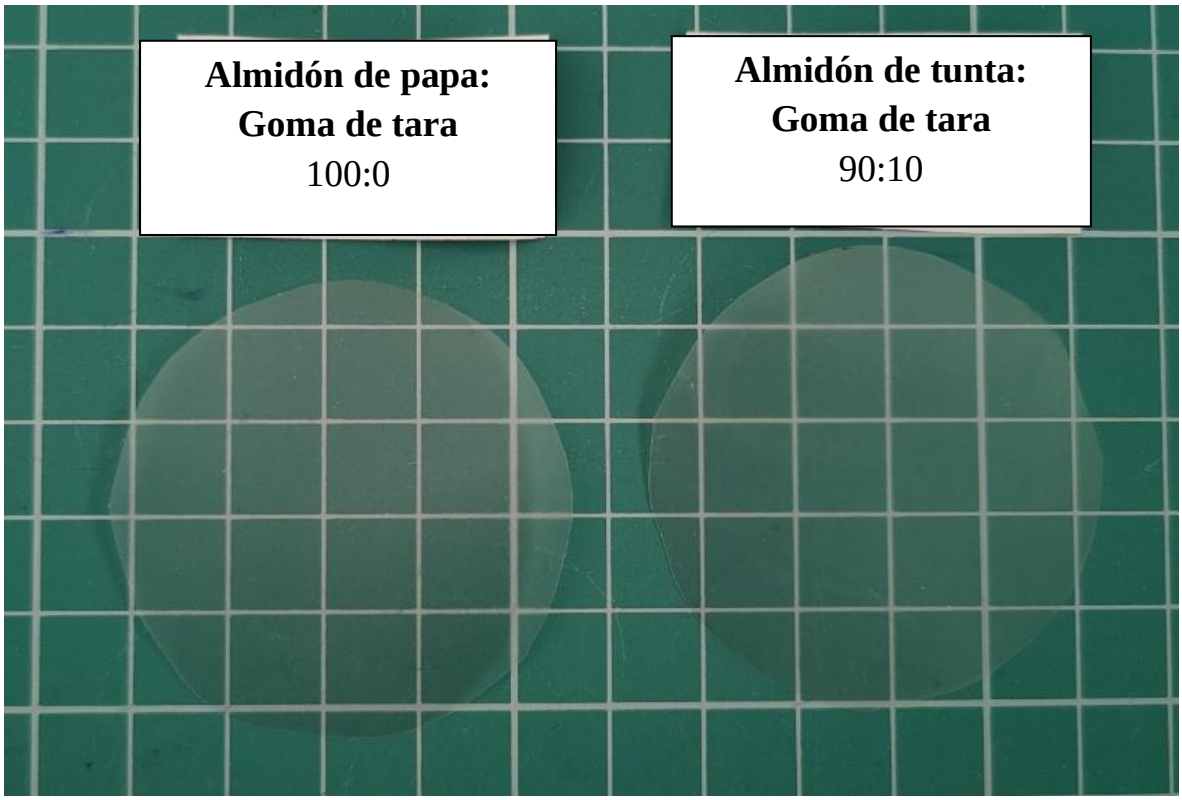


Figura 21: Películas óptimas desarrolladas para las mezclas de almidón de papa-goma de tara y almidón de tunta-goma de tara

El valor *L** es la luminosidad del color y se refiere a la relación entre la luz reflejada y absorbida (Meritaine da Rocha et al., 2018). Se puede observar que no existen diferencias estadísticas en el valor *L** entre la formulación óptima de AP-GT y AT-GT. Los valores de luminosidad se encuentran en el rango de 96.38-96.42, donde valores de *L** ~ 100 indican que las películas son claras (Otálora et al., 2021). Asimismo, valores altos de luminosidad en las películas de formulaciones óptimas denotan que estas películas son incoloras, luminosas y homogéneas (Meritaine da Rocha et al., 2018). Valores de luminosidad cercanos son reportados por autores como Nandi & Guha (2018) que señalan valores de *L** de 97.8 ± 0.26 en película de almidón de papa con goma guar; y Ma et al. (2016) reportan un valor de 97.91±0.59 en película de goma de tara con glicerol y sorbitol como plastificante.

Saberi et al. (2016) señalan que la adición de goma guar y glicerol disminuye el valor de *L** en películas de almidón de guisante, mientras que altas concentraciones de almidón aumenta el valor de *L**. Lo mismo es señalado por Arismendi et al. (2013) que reportan valores altos

de *L** a menores concentraciones de hidrocoloides en película de almidón de tapioca y goma xantana. De acuerdo con lo anteriormente mencionado, se puede resaltar que cada componente y su concentración en la película afecta los parámetros de color (Atarés & Chiralt, 2016).

Con respecto al parámetro de color *a**, los valores obtenidos se encuentran en el rango de 0.21-0.22, no existiendo diferencias significativas entre la formulación óptima de AP-GT y AT-GT. Este parámetro fue positivo en ambas formulaciones óptimas, lo que señala que las películas son de un tono ligeramente rojo, aunque esto no es apreciado visualmente (Figura 21). Estos resultados son similares a los reportados por Veiga-Santos et al. (2005) que señalan valores bajos de *a** en películas de almidón y goma guar (*a** <0.30). Otros autores como Saberi et al. (2017) y Nawab et al. (2016) señalan valores de *a** negativos en películas de almidón de guisante-goma guar y películas de almidón de semilla de mango-goma guar, respectivamente. Esta diferencia posiblemente es debido a que estos autores incorporan concentraciones de goma superiores a la formulación desarrollada en esta investigación y elevadas concentraciones de este galactomanano reducen el valor de *a** (Nawab et al., 2016; Saberi et al., 2016).

En el caso del parámetro de color *b**, este valor fue positivo en ambas películas óptimas, encontrándose en el rango de 2.83-2.85, no presentando diferencia estadística significativa entre ambas formulaciones. Valores similares de *b** son reportados en películas de almidón de papa y goma guar de 2.16 ±0.08 (Nandi & Guha, 2018). Nawab et al. (2017) reportan valores de *b** en el rango de 9.13-11.36 en películas de almidón de semilla de mango y goma guar, señalando que altas concentraciones de goma, aumentan el valor este parámetro de color. Este mismo comportamiento es señalado por Arismendi et al. (2013), Nandi & Guha (2018) y Saberi et al. (2016). Estos últimos autores atribuyen esta tendencia a la compactación de la cadena polimérica larga de la goma en películas de almidón de papa y goma guar.

Lo anteriormente mencionado en cuanto a las propiedades ópticas está estrechamente relacionado con la evaluación visual de las películas óptimas como se muestra en la Figura 21, donde se observa que las películas presentan una apariencia transparente, homogénea e incolora. Asimismo, es importante resaltar que el color característico de cada componente

de la película (goma de tara, almidón de papa o tunta y glicerol) está relacionado con los valores de *L**, *a** y *b** (Arismendi et al., 2013; Veiga-Santos et al., 2005).

Asimismo, la diferencia de color total entre las muestras (ΔE^*) señala que la diferencia entre las dos formulaciones óptimas es mínima (Tabla 13), por lo que, como mencionan Veiga-Santos et al. (2005), el color nativo de cada componente de la película está asociada a estos valores bajos de ΔE^*. Otros factores que pueden afectar los parámetros de color en películas de mezcla son el pH, el grado de reticulación, la cantidad de plastificante, el tratamiento térmico, el proceso de fabricación y las condiciones de almacenamiento (Pérez et al., 2016; Su et al., 2012).

El índice de amarillez (*YI*) es una medida de la amarillez percibida en la película que es clave en términos de aceptabilidad organoléptica, siendo deseable que el valor de *YI* sea bajo (Chakravartula et al., 2019; Espinel et al., 2014; Flores et al., 2010). En la Tabla 13 se reporta el valor de *YI* de las formulaciones óptimas encontrándose en el rango de 4.19-4.25, no observándose diferencias significativas entre las formulaciones.

Valores mayores de *YI* son reportados por Saberi et al. (2016) en películas de almidón de guisante y goma guar (*YI*=9.496 ± 1.061); y valores menores, por Nandi & Guha (2018) que señalan que en películas de almidón de papa y goma guar, donde el valor *YI* es de 1.41 ± 0.08. El desarrollo de enlaces de hidrógeno intermoleculares entre la goma y el almidón, y la estructura molecular cohesiva de las películas, da lugar a una estructura más compacta y está asociado al valor de amarillez de la muestra (Saberi et al., 2016; Singh et al., 2015).

El índice de blancura (*WI*) se refiere al grado en el que una superficie es blanca, es decir a la formación de una matriz blanca en películas (Suriyatem et al., 2018). Se observa que no hay diferencias significativas entre el *WI* de la formulación óptima AP-GT y AT-GT. El valor de *WI* se encuentra en el rango de 95.38-95.43, lo que denota que las películas son de matriz clara. Valores cercanos de *WI* son reportados por Saberi et al. (2016) que señalan un valor de 89.879 ± 7.152 en películas de almidón de guisante-goma guar y por Nandi & Guha (2018) que determinan en películas de almidón de papa-goma guar, un valor de *WI* de 84.39 ± 0.75. Este parámetro de color está relacionado con el almidón, a bajas concentraciones de este, menor es el valor de *WI* (Saberi et al. 2016; Suriyatem et al, 2018).

Respecto a la transmisión de luz, esta propiedad nos brinda información sobre la capacidad de la película de proteger al material empaquetado de la luz visible y UV; siendo la luz un agente catalizador de procesos de oxidación y degradación en los compuestos nutricionales u otros en los alimentos (Marvdashti et al., 2017). En la Tabla 14 se muestra la transmisión de luz (%) y transparencia ($A.mm^{-1}$) de películas óptimas.

Las películas mostraron un comportamiento variado cuando fueron sometidas al análisis de transmisión de luz visible y UV a diferentes longitudes de onda, desde 250 nm a 800 nm (Tabla 14). La película de AP-GT presenta una menor barrera a la transmisión de luz UV (250 nm a 400 nm) y en las regiones visibles (500 nm a 800 nm) comparado con las películas óptimas de AT-GT. En la Figura 22 se muestra transmitancia en las mezclas óptimas de AP-GT y AT-GT

Saberi et al. (2016) señalan que la posible causa de pérdida de transparencia a altas concentraciones de goma guar en películas de almidón de guisante-goma guar es debido a la separación de fases, ya que ocurren interacciones entre la amilosa y la amilopectina, y el hidrocoloide formando estructuras de red, lo que genera una compactación de las cadenas poliméricas, y, por ende, la transmisión de luz se ve reducida. Otro factor que puede afectar la transmitancia es el mayor contenido de amilosa en el AP que en el AT (Cuba, 2020; Martínez et al., 2022), ya que como se explicó en el acápite 4.1.1., este elevado contenido de amilosa favorece la agregación/baja dispersión, lo que genera una menor compactación de las cadenas de la matriz, y, por lo tanto, posee una trasmisión de luz mayor.

En el rango visible (500-800 nm), la transmitancia en la mezcla de AP-GT y AT-GT osciló entre 74.2 % a 72.3 % y 69.3% a 71.0%, respectivamente. Otros estudios reportan valores menores de transmitancia en películas al cuatro por ciento de almidón de rizoma de loto (*Nelumbo nucifera*) que oscilan en 47.9% a 65.4% (Sukhija et al., 2016); en películas de almidón de mango con goma guar y goma xantana (ambos al 0.6%), entre 35.8 % a 55.3% y 34.1% a 54.6%, respectivamente (Nawab et al., 2017); y en películas de gelatina de pescado y harina de arroz (5:5), entre 26.63 % a 30.98%, respectivamente. La diferencia en la transmisión de luz está relacionada a la morfología o estructura química característica de cada película que está relacionada con el peso molecular de la misma (Meritaine da Rocha et al., 2018).

Tabla 14: Transmisión de luz (en porcentaje) y Transparencia ($A.mm^{-1}$) de películas óptimas

Película	Transmisión de luz (%)							Transparencia
Longitud de onda (nm)	250	280	300	400	500	600	800	($A.mm^{-1}$)
AP-GT	69.6	71.5	73.7	75.0	74.2	73.2	72.3	1.78 ± 0.06^{b}
AT-GT	44.6	53.6	60.1	68.0	69.3	69.7	71.0	1.96 ± 0.13^{a}

AP: Almidón de papa, AT: Almidón de tunta y GT: Goma de tara. Valores medios y desviaciones estándar. Las letras diferentes dentro de la misma columna son significativamente diferentes ($p < 0.05$) por la prueba Tukey.

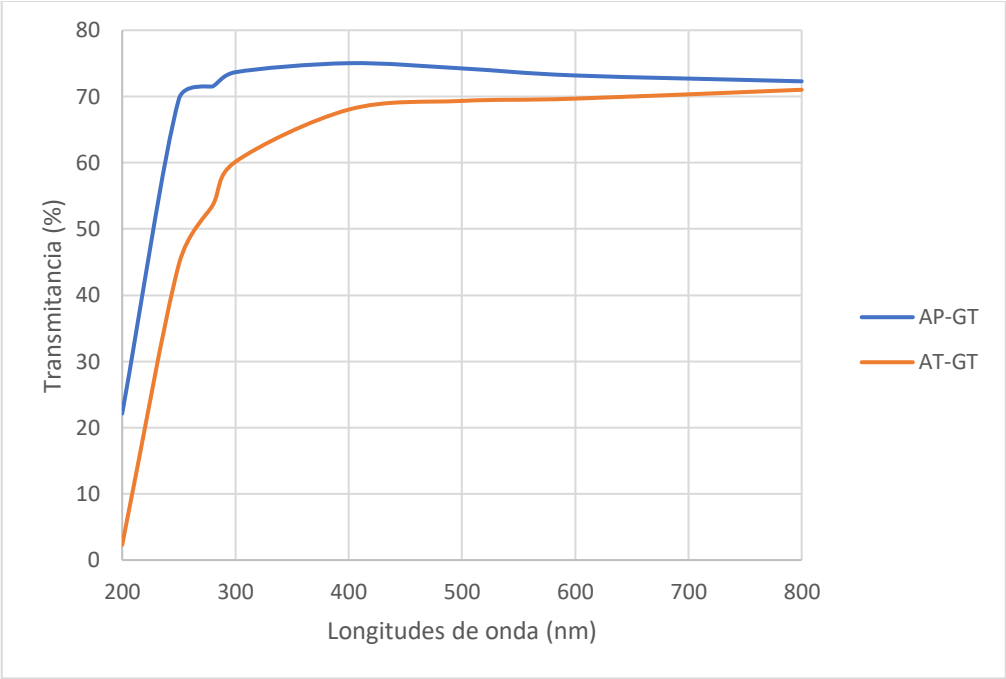


Figura 22: Transmitancia en las mezclas óptimas de AP-GT y AT-GT

El valor de transparencia es un indicador del grado que permite que la luz pase a través de la película (Nandi & Guha, 2018). El valor de transparencia de las películas óptimas se encuentra en los rangos entre 1.78-1.96 $A.mm^{-1}$, siendo las películas de la mezcla AT-GT más transparentes (1.96) y las de la mezcla AP-GT, más opacas (1.78) ($p<0.05$) (Tabla 14).

Valores cercanos de transparencia son reportados por Nawab et al. (2017) que señalan que en películas de almidón de semilla de mango y goma guar, el valor de transparencia se

encuentra en un rango de 2.82-4.05 $A.mm^{-1}$. Como anteriormente se menciona, con la adición de la GT, es muy posible que ocurra una compactación de las cadenas poliméricas, lo que modifica el índice de refracción y dificulta el paso de la luz a través de la matriz (Ortega-Toro et al., 2014). Kim et al. (2015) señalan que la adición de gomas generalmente disminuye la claridad de películas de almidón, y, por lo tanto, el valor de transparencia, sin embargo, esto no se ve reflejado en los valores de transparencia de las películas óptimas.

Asimismo, la transparencia es un indicador de la miscibilidad en películas de mezclas de polímeros (Liu & Zhang, 2006; Xu et al., 2007). La mejor transparencia de las películas de mezcla se observa en la mezcla AT-GT lo que indica una mejor miscibilidad entre el AT y la GT. Para aplicaciones de la película, este parámetro es un factor importante que considerar, ya sea si esta se aplicará como recubrimiento superficial de alimentos o para modificar la apariencia del producto (Prakash Maran et al., 2013 citado por Saberi et al., 2016).

Con respecto a las propiedades mecánicas, la resistencia mecánica y la extensibilidad son propiedades necesarias que conocer para evaluar la resistencia de la película a la tensión y su capacidad de mantener su integridad durante la manipulación, transporte y almacenamiento cuando es aplicada en productos alimentarios (Homez-Jara et al., 2018; Martins et al., 2012).

Los resultados de la fuerza de tracción (FT) de las películas óptimas se presentan en la Tabla 13. Se observa una diferencia significativa en las películas óptimas en el valor de la fuerza de tracción, donde la película de formulación óptima AT-GT es mayor a la de AP-GT (10.65 MPa y 5.02 MPa, respectivamente) ($p<0.05$). La diferencia entre los valores de FT de las dos formulaciones óptimas puede ser explicado por el efecto del almidón, la goma de tara y la interacción de estos dos componentes. Como se comentó en el acápite 4.1.1., el AT favorece las interacciones con la goma de tara, lo que genera una estructura más resistente a la tracción en comparación con el AP.

Diversos autores reportan el efecto fortalecedor de la adición de gomas en películas de almidón. En películas de almidón de papa y goma guar, el valor de la FT aumenta de 1.7 MPa a 10.5 MPa con el incremento de la goma guar y almidón de papa (Nandi & Guha,

2018). Estudios en películas de almidón de semilla de mango señalan que la adición de goma guar y goma xantana de 10% y 20% mejora el valor de FT de una muestra control de 3.57 MPa a 8.62 y 10.24 MPa para goma guar y 7.35 y 8.70 MPa para goma xantana (Nawab et al., 2017). En películas de almidón de guisante y goma guar se observó que el valor máximo de FT se obtuvo cuando la concentración de estos polímeros fue mayor, donde en películas con 2 g de almidón, 0.1 g de goma guar y 25% de glicerol se obtuvo un valor de FT de 6.61 MPa; y en películas con 3 g de almidón, 0.5 g de goma guar y 25% de glicerol, un valor de FT de 34.10 MPa (Saberi et al., 2016).

Asimismo, Da Matta et al. (2011) señalan que generalmente existe una relación entre el alargamiento a la rotura y la fuerza de tracción en las películas, ya que, ante el aumento de uno de este parámetro, en consecuencia, disminuye el otro. Este comportamiento es evidenciado en las películas óptimas donde en el caso de la formulación óptima de AP-GT presenta un alto valor de alargamiento a la rotura y un menor valor de fuerza de tracción, mientras que la formulación AT-GT, presenta un comportamiento inverso.

Es importante resaltar que debido al proceso de recristalización del almidón en las películas almacenadas por largos periodos de tiempo ocurre una agregación progresiva de las cadenas poliméricas, lo que provoca un aumento de la compacidad de la matriz, y, por ende, cambios en la respuesta a la tracción (Jiménez et al., 2012b). Además, Cuba (2021) señala que los valores de retrogradación de almidones de tunta (RG= 632.73-765.23 cP) fueron significativamente más bajos que en almidones de papa (RG= 829.73-1017.66 cP), lo que contribuye con una menor cristalización de la película de AT-GT en condiciones de almacenamiento prolongado.

Para el alargamiento a la rotura (AR), los resultados de las películas óptimas se presentan en la Tabla 13, observándose rangos entre 11.52 – 15.38 %, observándose una diferencia significativa entre estos resultados ($p<0.05$). Estos valores son cercanos a los reportados por Nandi & Guha (2018) que señalan valores de AR de 8.60 ± 0.88 % en películas optimizadas de almidón de papa y goma guar; Otálora et al. (2021), valores de 11-15% en filmes de papa andina y gelatina; y De Morais et al. (2017), valores de 23.48-30.10% en películas de quitosano con goma xantana. Otros autores reportan valores mayores como Xiaoqing et al. (2021) que señala un valor de AR de 109.91 ± 2.31% en películas de almidón de papa y

gelatina. Los valores mayores de AR de la formulación de AP-GT puede atribuirse a la no presencia de GT, que permite la formación de una matriz en la película más abierta, que favorece las propiedades de extensibilidad (como se explica en el acápite 4.1.2.).

Respecto a la permeabilidad al vapor de agua (PVA), es importante resaltar que el agua es el principal responsable de las reacciones de deterioro y cambios de textura en los alimentos, lo que afecta la calidad y estabilidad de estos. Es por ello, que es importante que el empaque de alimento impida la transferencia de humedad entre los alimentos y el medio ambiente, siendo deseable que la transferencia sea mínima, es decir, que el valor de permeabilidad al vapor de agua (PVA) sea bajo, por lo que esta propiedad es fundamental para evaluar la eficiencia del material como empaque (Sukhija et al., 2016). Las propiedades de PVA se presentan en la Tabla 13. Se observa que existen diferencias significativas entre los valores de PVA obtenidos en las dos formulaciones óptimas (AP-GT y AP-GT) ($p<0.05$). Los valores de PVA se encuentran en el rango 6.14-7.26 x 10^{-11} g/msPa.

Resultados similares son reportados por Sukhija et al. (2016) que señalan valores de PVA de 7.08 x 10^{-11} g/msPa en películas de almidón de loto al 4% y de 2.51 x 10^{-11} g/msPa en películas de almidón de loto: concentrado de proteína de suero: cáscara de psyllium (3:2:0.04). Otros autores reportan valores de PVA menores a los mencionados anteriormente, como Melo et al. (2011) que señalan que en películas de almidón de yuca y goma xantana, el valor de PVA se encuentran en un rango de 1.02-1.55 x 10^{-10} g/msPa, resaltando, además, que la adición de goma xantana no afecta los valores de PVA. Xiaoqing et al. (2021) reportan valores similares de PVA en películas de almidón de papa, gelatina y glicerol siendo de 1.50 ± 0.02 x 10^{-10} g/msPa. (De Morais et al., 2017) indican que en películas de quitosano con goma xantana, los valores de PVA se encontraron en el rango de 1.31×10^{-10} a 1.41×10^{-10} g/msPa, señalando también que la adición de goma xantana no afecta los valores de PVA.

La diferencia entre los valores de PVA puede ser explicado debido a factores como el coeficiente de solubilidad, la integridad de la matriz de la película, la hidrofobicidad, la velocidad de difusión, el espesor, la movilidad de la cadena polimérica y las interacciones entre los grupos funcionales de los polímeros y el permeante (Sapper et al., 2019).

Por último, la prueba de desintegración en compost está relacionada con la transformación bioquímica de los compuestos por parte de los microorganismos y la propensión del material a descomponerse en sus moléculas constituyentes mediante procesos naturales (Maran et al., 2014). El análisis de desintegración de las películas simula condiciones de degradación en ambientes naturales, donde el suelo está generalmente compuesto por una microflora formada por bacterias, actinomicetos, hongos y protozoos que actúan en sinergia en el proceso de degradación (Martucci & Ruseckaite, 2009). En la Tabla 13 se puede observar que la formulación óptima de AT-GT presenta un porcentaje de desintegración en compost significativamente mayor que la formulación óptima de AP-GT ($p<0.05$).

De acuerdo con la norma ISO 20200 (2023), un material puede considerarse totalmente desintegrable cuando el 90% de la masa de la muestra se pierda en los 90 días siguientes a la prueba. En la prueba de desintegración en compost desarrollada en esta investigación se ha sometido las películas a cinco días en compost, obteniéndose una pérdida de masa de 63.9% y 71% para la formulación de AP-GT y AT-GT, respectivamente. Por lo que es muy probable que, bajo los 90 días de prueba, las películas se desintegren en su totalidad, lo que indica que son una buena alternativa frente al uso de polímeros no biodegradables, y además permitirían un descarte adecuado en el medio ambiente (Assis et al., 2017).

Autores como Maran et al. (2014) reportan valores de pérdida de masa en cinco días de compostaje de alrededor del 30% en películas de almidón de yuca. Assis et al. (2017) señalan valores de entre 35 y 38% en películas de almidón de yuca con nanocápsulas de licopeno. Asimismo, Bonilla & Sobral (2020) reportan que películas de gelatina se desintegran totalmente al quinto día de compostaje. Por otro lado, Jaramillo et al. (2016) señalan que la adición de yerba mate a películas de almidón de yuca favoreció una más rápida degradación de las películas, donde se observa que a los 12 días estas películas estaban casi completamente desintegradas; y Anubha et al. (2022) reportan que la degradación a los 30 días en películas de mezclas (almidón de maíz y goma neem) es significativamente mayor (64-69% en peso) que en películas de almidón solo (17.3%).

La diferencia entre estos diversos autores puede ser debido a factores que afectan la degradación como la composición y estructura química del polímero, las características de estos (naturaleza del enlace químico, la estabilidad de los grupos funcionales, la reactividad,

la hidrofilia y el comportamiento de hinchamiento, la flexibilidad de las cadenas, la cristalinidad, la hidrofobicidad, el tamaño molecular), factores ambientales (la temperatura, el pH del medio, la presencia de oxígeno, la humedad, los microorganismos) (Dhall & Alam, 2019).

Debido a que los componentes de la película (almidón, goma de tara y glicerol) son hidrofílicos, estos favorecen la absorción de agua, aumentando la actividad hídrica de la película y favoreciendo el crecimiento de los microorganismos naturalmente presentes en el suelo, aumentando así la pérdida de masa de las películas durante el proceso de degradación ya que actúan como fuente de carbohidratos (Assis et al., 2017; Maran et al., 2014; Seligra et al., 2016). Es decir, se espera que la solubilidad y el grado de hinchamiento están estrechamente relacionados con la desintegración en compost y como se observa en el Tabla 13, este comportamiento no es el obtenido, ya que a pesar de que, la solubilidad en agua y el grado de hinchamiento de la película óptima de AP-GT se obtiene una menor desintegración en compost en comparación con la formulación óptima de AT-GT.

4.3.2. PROPIEDADES MORFOLÓGICAS Y ESTRUCTURALES

a. ESPECTROMETRÍA INFRARROJO CON TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR)

En la Figura 23 se muestran los espectros de las películas de las mezclas de AP-GT y AT-GT optimizadas. La banda ancha en 3000-3700 cm^{-1} está relacionada con la vibración de estiramiento de los grupos O-H libres, intermoleculares e intramoleculares (Antoniou et al., 2015; Saberi et al., 2017) y los picos en la región 3000-2800 cm^{-1} son el resultado del estiramiento C-H (Kizil et al., 2002). El pico agudo en 2928 cm^{-1} es una vibración C-H característica (Anicuta et al., 2010). Los picos en 2995 y 2928cm^{-1} están asociados a las vibraciones del tramo C-H siendo característicos de materiales de matriz polimérica (Jaramillo et al., 2016; Mathew et al., 2006).

La intensidad del pico a 3292 cm^{-1} (estiramiento del grupo O-H del almidón) es mayor en la formulación óptima de la mezcla AT-GT que en la mezcla AP-GT. Los materiales con

OH que vibren más fácilmente o formen más enlaces de hidrógeno tienden a presentar una banda más ancha y una menor intensidad (Seligra et al., 2016). Por lo que, la baja intensidad en el pico de estiramiento del grupo O-H en la mezcla óptima AP-GT indica una menor presencia de enlaces de hidrógeno. Es importante resaltar que, el entrecruzamiento entre los polímeros se fortalece por la presencia de hidrógeno intermolecular y enlaces O-H (Xiaoqing et al., 2021).

La estructura en el área entre 1200 y 950 cm^{-1} es la región de huellas dactilares distintiva de una molécula. Las vibraciones de estiramiento asociadas al enlace C-O se encuentran en la región de 990 cm^{-1}y 1160 cm^{-1}, las bandas asociadas al enlace C-O-H se encuentran en 1150 cm^{-1}y 1080 cm^{-1}, mientras que la banda entre 994 cm^{-1} y 1077 cm^{-1} señala el estiramiento O-C del anillo de la anhidroglucosa (Saberi et al., 2017). Alrededor de 930 cm^{-1} se observa la banda característica de los enlaces glucosídicos (Kizil et al., 2002).

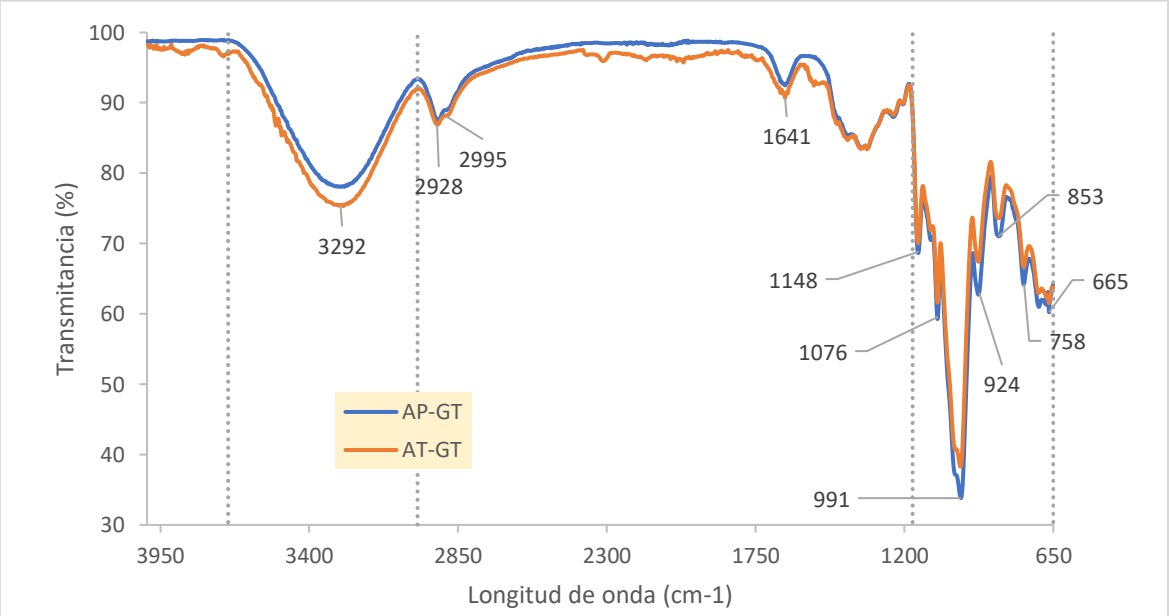


Figura 23: Espectros FTIR para películas optimizadas de AP-GT y AT-GT

b. MICROSCOPÍA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM)

Mediante el estudio de la microestructura de las muestras de películas se puede establecer una relación entre la orientación molecular en la matriz y las propiedades físico-mecánicas

de las películas; asimismo, estudiar las características morfológicas y la interacción entre los componentes de las películas biodegradables (Mostafavi et al., 2016; Sukhija et al., 2016).

Las micrografías de las superficies de las películas se muestran en la Figura 24. La película óptima de AP-GT muestra superficies irregulares, pero sin grietas, roturas o aberturas, lo que es un indicador de la miscibilidad y compatibilidad de los componentes empleados en la elaboración de las películas (almidón de papa, goma de tara y glicerol) (Nawab et al., 2016; Saberi et al., 2017). Estructuras con características similares han sido observadas en películas de almidón de papa y goma guar (Nandi & Guha, 2018); y películas de almidón de guisante y goma guar (Saberi et al., 2017). Estas partículas irregulares distribuidas uniformemente en la película a lo largo de la red de las películas podrían atribuirse al gránulo de almidón hinchado y a sus restos (Saberi et al., 2017).

En el caso de la película óptima de AT-GT se observa una película más homogénea, lo que señala que los componentes se dispersaban bien entre sí, lo que permite la formación de una estructura uniforme e integral (Askari et al., 2018). Los resultados de las micrografías confirman los resultados de la película óptima AT-GT de mejor fuerza de tracción, menor solubilidad en agua y mayor barrera al vapor de agua de (Ahmad et al., 2015). Asimismo, es importante resaltar que la aparición de arrugas en la superficie no implica que esta sea irregular o discontinua, sino que pueden ser ocasionadas por la adhesión entre la película y la placa de plástico al despegar la película (Xiaoqing et al., 2021). Resultados similares en otras investigaciones son reportados en la literatura donde se observa una superficie lisa y compacta en películas de mezclas de almidón y otros hidrocoloides (Askari et al., 2018; Lozano-Navarro et al., 2018; Wang et al., 2017).

Las micrografías de las secciones transversales de las películas se muestran en la Figura 25. Las imágenes de la sección transversal en la formulación óptima de AP-GT muestran una textura casi homogénea, mostrando una buena integridad estructural de la película (Nawab et al., 2017). Las ondulaciones en la micrografía pueden deberse probablemente a la contracción durante la congelación en nitrógeno líquido (Antoniou et al., 2015).

Asimismo, en la formulación óptima de AT-GT se observa que en la sección transversal hay una presencia alta de discontinuidades (formación de una estructura en capas), lo que está

relacionado con el menor alargamiento a la rotura de esta formulación (Assis et al., 2017). Asimismo, se observa una distribución irregular de pequeños agregados que podría deberse a interacciones incompletas entre el AT y el GT o la gelatinización incompleta de los gránulos de almidón de tunta (Nandi & Guha, 2018). Los resultados observados en la micrografía pueden atribuirse a la fuerte interacción intermolecular, al entrelazamiento y a la formación de la fase continua de la matriz polimérica (Sukhija et al., 2016).

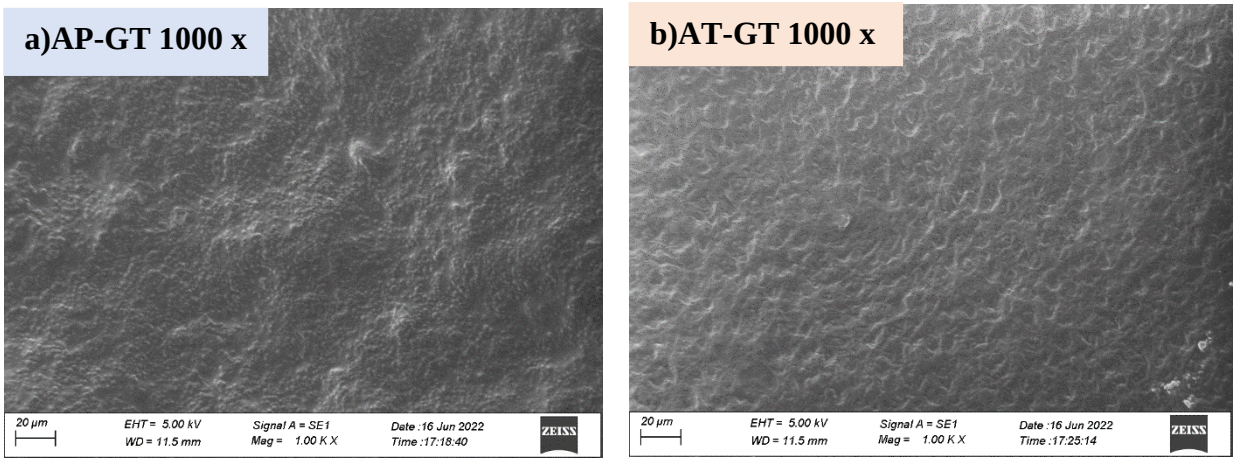


Figura 24: Micrografía de la sección superficial de (a) mezcla óptima de AP-GT a 1000 x y (b) mezcla óptima de AT-GT a 1000 x.

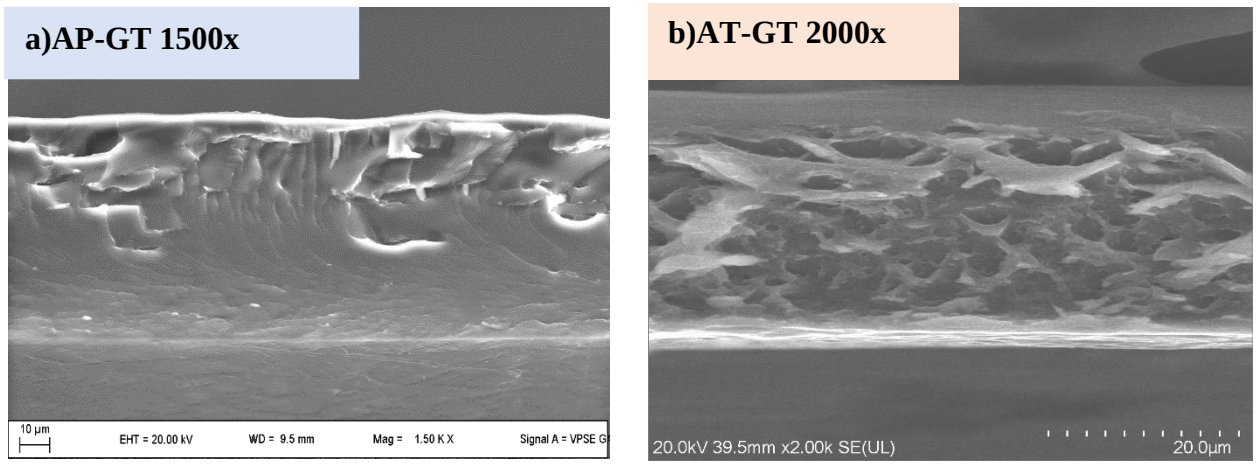


Figura 25: Micrografía de la sección transversal de (a) mezcla óptima de AP-GT a 1500x y (b) mezcla óptima de AT-GT a 2000x

V. CONCLUSIONES

1. El almidón de papa o tunta de la variedad de papa nativa Ocucuri negra y la goma de tara y la interacción de estos dos componentes tienen en un efecto significativo en las propiedades mecánicas y de barrera de las películas.

2. En el caso de la formulación AT-GT y AP-GT, sólo el almidón y la GT tienen un efecto positivo en la fuerza de tracción (FT). En el caso del alargamiento a la rotura (AR), en la mezcla de AP-GT y AT-GT, el almidón, la goma y la interacción de estos dos componentes tienen un impacto positivo. Por último, con respecto a la permeabilidad al vapor de agua (PVA), en la formulación de AT-GT, el almidón, la goma y la interacción de estos dos componentes tienen un efecto positivo en esta variable, mientras que en la formulación AP-GT, sólo la presencia de almidón y goma tienen un efecto positivo.

3. Se determinó la proporción óptima de la mezcla almidón de papa-goma de tara (100-0); y en la mezcla de almidón de tunta-goma de tara (90-10), considerando como criterio de optimización maximizar la fuerza de tracción (FT), mantener en un rango aceptable el alargamiento a la rotura (AR) y minimizar la permeabilidad al vapor de agua (PVA).

4. Los valores de humedad de las películas óptimas se encuentran en el rango entre 17.71-18.32 %. La solubilidad en agua (SA) y el grado de hinchamiento (GH) de la película óptima del AP-GT es mayor que en la película óptima de AT-GT.

5. Se observó que no existen diferencias significativas en los parámetros de color evaluados (L*, a*, b ΔE^*, YI y WI) en las formulaciones óptimas. Siendo las películas óptimas claras (L* cercano a 100), ligeramente de tono rojo (valor de a* de 0.21-0.22), de tono amarillo (valor de b* de 2.83-2.85), con una diferencia de color mínima ($\Delta E^* < 0.80$), un índice de amarillez bajo (YI de 4.19-4.25) y un índice de blancura (WI) cercano a 100.

6. Las películas óptimas de AT-GT presentaron una mayor barrera a la transmisión de luz UV (250 nm a 400 nm) y en las regiones visibles (500 nm a 800 nm) comparado con las películas óptimas de AP-GT.

7. La formulación óptima de AP-GT presentó un mayor alargamiento a la rotura y una menor fuerza de tracción que la formulación AT-GT. Asimismo, la permeabilidad al vapor de agua no presenta diferencia significativa entre las dos formulaciones óptimas.

8. El porcentaje de desintegración en compost de las películas a los cinco días demuestra que estos materiales pueden considerarse desintegrables según la norma ISO 20200:2023. Por lo que, representan una alternativa al uso de polímeros no biodegradables, ya que permite una eliminación adecuada en el medio ambiente.

VI. RECOMENDACIONES

- Evaluar la incorporación de materiales de refuerzo u otros polímeros compatibles, para reducir la alta afinidad al agua de las películas desarrolladas, asimismo considerando la mejora de las propiedades mecánicas y de barrera de las películas de almidón y goma de tara.

- Evaluar la integración de agentes activos, como compuestos antimicrobianos o antioxidantes, para ampliar la funcionalidad de las películas y su potencial aplicación en sistemas de envasado.

VII. BIBLIOGRAFÍA

Ahmad, M., Hani, N. M., Nirmal, N. P., Fazila, F. F., Mohtar, N. F., & Romli, S. R. (2015). Optical and thermo-mechanical properties of composite films based on fish gelatin/rice flour fabricated by casting technique. Progress in Organic Coatings, 84: 115–127. doi: 10.1016/j.porgcoat.2015.02.016

Alcázar-Alay, S. C., & Meireles, M. A. A. (2015). Physicochemical properties, modifications and applications of starches from different botanical sources. Food Science and Technology (Brazil), 35(2): 215–236. doi: 10.1590/1678-457X.6749

Alvarado, S., Sandoval, G., Palos, I., Tellez, S., Aguirre-Loredo, Y., & Velazquez, G. (2015). The effect of relative humidity on tensile strength and water vapor permeability in chitosan, fish gelatin and transglutaminase edible films. Food Science and Technology, 35(4): 690–695. doi:10.1590/1678-457x.6797

Anicuta, S., Dobre, L., Stroescu, M., & Jipa, I. (2010). Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy for characterization of antimicrobial films containing chitosan. Analele Universitatii Din Oradea Fascicula: Ecotoxicologie, Zootehnie Si Tehnologii de Industrie Alimentara (p. 1234–1240).

Antoniou, J., Liu, F., Majeed, H., Qazi, H. J., & Zhong, F. (2014). Physicochemical and thermomechanical characterization of tara gum edible films: Effect of polyols as plasticizers. Carbohydrate Polymers, 111: 359–365. doi: 10.1016/j.carbpol.2014.04.005

Antoniou, J., Liu, F., Majeed, H., & Zhong, F. (2015). Characterization of tara gum edible films incorporated with bulk chitosan and chitosan nanoparticles: A comparative study. Food Hydrocolloids, 44: 309–319. doi: 10.1016/j.foodhyd.2014.09.023

Anubha, M., Saranya, R., Chandrasatheesh, C., & Jayapriya, J. (2022). Effect of neem gum on water sorption, biodegradability and mechanical properties of thermoplastic corn starch-based packaging films. Indian Chemical Engineer, 64(5): 594-606. doi: 10.1080/00194506.2022.2065368

Arismendi, C., Chillo, S., Conte, A., del Nobile, M. A., Flores, S., & Gerschenson, L. N. (2013). Optimization of physical properties of xanthan gum/tapioca starch edible matrices containing potassium sorbate and evaluation of its antimicrobial effectiveness. LWT: Food Science and Technology, 53(1): 290–296. doi: 10.1016/j.lwt.2013.01.022

Ashter, S. A. (2016). Commercial Applications of Bioplastics. Introduction to Bioplastics Engineering, 227–249. doi: 10.1016/b978-0-323-39396-6.00009-9

Askari, F., Sadeghi, E., Mohammadi, R., Rouhi, M., Taghizadeh, M., Hosein Shirgardoun, M., & Kariminejad, M. (2018). The physicochemical and structural properties of psyllium gum/modified starch composite edible film. Journal of Food Processing and Preservation, 42(10): 1–9. doi: 10.1111/jfpp.13715

Assis, R. Q., Lopes, S. M., Costa, T. M. H., Flôres, S. H., & Rios, A. de O. (2017). Active biodegradable cassava starch films incorporated lycopene nanocapsules. Industrial Crops and Products, 109: 818–827. doi: 10.1016/j.indcrop.2017.09.043

Atarés, L., & Chiralt, A. (2016). Essential oils as additives in biodegradable films and coatings for active food packaging. Trends in Food Science and Technology, 48: 51–62. doi: 10.1016/j.tifs.2015.12.001

Barraza-Garza, G., de La Rosa, L. A., Martínez-Martínez, A., Castillo-Michel, H., Cotte, M., & Alvarez-Parrilla, E. (2013). La microespectroscopía de infrarrojo con transformada de fourier (FTIRM) en el estudio de sistemas biológicos. Revista Latinoamericana de Quimica, 41(3):125–148. Recuperado de https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-5943201300030000.

BeMiller, J. N. (2019a). Gellans, Curdlan, Dextrans, Levans, and Pullulan. En Carbohydrate Chemistry for Food Scientists (p. 271–278). Woodhead Publishing and AACC International Press. doi: 10.1016/b978-0-12-812069-9.00012-1

BeMiller, J. N. (2019b). Guar, Locust Bean, Tara, and Cassia Gums. En Carbohydrate Chemistry for Food Scientists (p. 241–252). Woodhead Publishing and AACC International Press. doi: 10.1016/b978-0-12-812069-9.00009-1

BeMiller, J. N. (2019c). Xanthan. En Carbohydrate Chemistry for Food Scientists (p. 261–269). Woodhead Publishing and AACC International Press. doi: 10.1016/b978-0-12-812069-9.00011-x

Bierhalz, A. C. K., da Silva, M. A., & Kieckbusch, T. G. (2020). Fundamentals of two-dimensional films and membranes. En M. Agostini de Moraes, C. Ferreira da Silva & R. Silveira (Eds.), Biopolymer Membranes and Films (p. 35-66). Elsevier. doi: 10.1016/b978-0-12-818134-8.00002-x

Biliaderis, C. G., & Izydorczyk, M. S. (2007). Functional food carbohydrates. Nueva York, Estados Unidos: CRC Press.

Bonilla, J., & Sobral, P. J. A. (2020). Disintegrability under composting conditions of films based on gelatin, chitosan and/or sodium caseinate containing boldo-of-Chile leafs extract. International Journal of Biological Macromolecules, 151: 178–185. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2020.02.051

Bourbon, A. I., Pinheiro, A. C., Cerqueira, M. A., Rocha, C. M. R., Avides, M. C., Quintas, M. A. C., & Vicente, A. A. (2011). Physico-chemical characterization of chitosan-based edible films incorporating bioactive compounds of different molecular weight. Journal of Food Engineering, 106(2): 111–118. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2011.03.024

Bourtoom, T., & Chinnan, M. S. (2008). Preparation and properties of rice starch-chitosan blend biodegradable film. LWT: Food Science and Technology, 41(9): 1633–1641. doi: 10.1016/j.lwt.2007.10.014

Byun, Y., Zhang, Y., & Geng, X. (2014). Plasticization and Polymer Morphology. En J. Han (Ed.), Innovations in Food Packaging (p. 87-108). doi: 10.1016/B978-0-12-394601-0.00005-9

Cahuana, R., & Arcos, J. (2002). Variedades Nativas y Mejoradas de Papa en Puno. Lima, Perú: Instituto Nacional de Innovación Agraria. Recuperado de https://repositorio.inia.gob.pe/items/881ec420-f5f5-43f3-a520-fb2cbdea7632

Callister, W. (2020). Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales I. Barcelona, España: Editorial Reverté.

Cano, A., Jiménez, A., Cháfer, M., Gónzalez, C., & Chiralt, A. (2014). Effect of amylose:amylopectin ratio and rice bran addition on starch films properties. Carbohydrate Polymers, 111: 543–555. doi: 10.1016/j.carbpol.2014.04.075

Canqui, F., & Morales, E. (2009). Conocimiento Local en el Cultivo de la Papa. Cochabamba, Bolivia: Fundación PROINPA. Recuperado de https://www.proinpa.org/web/pdf/Papa/Abioticos/Conocimiento%20Local%20en%20el%20Cultivo%20de%20la%20Papa%20.pdf

Carballo, E. A., & Martínez, E. S. (2010). Determinación de la permeabilidad al vapor de agua por el método ASTM E96/E 96M-05 en películas de quitosano (Tesis de grado, Universidad de El Salvador). Recuperada de https://repositorio.ues.edu.sv/items/3fedf8e6-1f0a-4372-8b57-ed58f592bcf0.

Cardenas, L. (2018). Niveles de Glicoalcaloides durante la elaboración del chuño negro a partir de la papa amarga Solanum juzepczukii y Solanum curtilobum (Tesis de maestría, Universidad Nacional de San Agustin de Arequipa). Recuperada de https://repositorio.unsa.edu.pe/items/754339c3-ad41-4057-a202-998a1dfcea76.

Buse, E., Chong, M., & Obregón, C. (2021). La papa, sus aportes en el pasado, presente y futuro del Perú. En A. Beltrán, C. A. Sanborn & G. Yamada (Eds.), En búsqueda de un desarrollo integral: 20 ensayos en torno al Perú del Bicentenario (p. 395-413). Universidad del Pacífico. Recuperado de https://hdl.handle.net/11354/3118

Chakravartula, S. S. N., Soccio, M., Lotti, N., Balestra, F., Dalla Rosa, M., & Siracusa, V. (2019). Characterization of composite edible films based on pectin/alginate/whey protein concentrate. Materials, 12(15). doi: 10.3390/ma12152454

Charro Espinosa, M. M. (2015). Obtención de plástico biodegrable a partir de almidón de patata (Tesis de grado, Universidad Central del Ecuador). Recuperada de https://typeset.io/pdf/obtencion-de-plastico-biodegradable-a-partir-de-almidon-de-2dcmu5vnvw.pdf.

Chen, M.; Wang, Y.; Wang, L.; & Yin, S. (2014). Effects of Temperature and Humidity on the Barrier Properties of Biaxially-Oriented Polypropylene and Polyvinyl Alcohol Films. Journal of Applied Packaging Research, 6(1): 40-46. doi: 10.14448/japr.01.0004

Cornell, J. A. (2002). The Original Mixture Problem: Designs and Models for Exploring the Entire Simplex Factor Space. En Primer on Experiments with Mixtures (p. 23-93). John Wiley & Sons. doi: 10.1002/9780470907443.ch2

Cortés-Rodríguez, M., Villegas-Yépez, C., Gil González, J. H., Rodríguez, P. E., & Ortega-Toro, R. (2020). Development and evaluation of edible films based on cassava starch, whey protein, and bees wax. Heliyon, 6(9). doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e04884

Cuba, A. (2021). Caracterización fisicoquímica y funcional de almidones de Papa y Tunta de tres variedades nativas amargas procedentes de Ilave-Puno (Tesis de grado, Universidad Nacional Agraria La Molina). Recuperada de http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/2131/L02-C389-T.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

Da Matta, M. D., Sarmento, S. B. S., De Oliveira, L. M., & Zocchi, S. S. (2011). Mechanical properties of pea starch films associated with xanthan gum and glycerol. Starch/Staerke, 63(5): 274–282. doi: 10.1002/star.201000088

De Morais Lima, M., Carneiro, L. C., Bianchini, D., Dias, A. R. G., Zavareze, E. da R., Prentice, C., & Moreira, A. da S. (2017). Structural, Thermal, Physical, Mechanical, and Barrier Properties of Chitosan Films with the Addition of Xanthan Gum. Journal of Food Science, 82(3): 698–705. doi: 10.1111/1750-3841.13653

Devaux, A., Hareau, G., Ordinola, M., & Andrade-piedra, J. (2021). Las papas nativas: de ser un cultivo olvidado al boom culinario e innovación de mercado. Revista Latinoamericana de La Papa, 25(2): 3–14. doi: 10.37066/ralap.v25i2.429

Dhall, R. K., & Alam, M. S. (2019). Biodegradable Packaging. En S. Hashmi & I. Ahmed Choudhury (Eds.), Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials 3 (p. 26-43). Cham, Alemania: Elsevier. doi: 10.1016/b978-0-12-803581-8.11516-4

Dick, M., Costa, T. M. H., Gomaa, A., Subirade, M., Rios, A. D. O., & Flôres, S. H. (2015). Edible film production from chia seed mucilage: Effect of glycerol concentration on its

physicochemical and mechanical properties. Carbohydrate Polymers, 130: 198–205. doi: 10.1016/j.carbpol.2015.05.040

do Val Siqueira, L., Arias, C. I. L. F., Maniglia, B. C., & Tadini, C. C. (2021). Starch-based biodegradable plastics: methods of production, challenges and future perspectives. Current Opinion in Food Science, 38: 122–130. doi: 10.1016/j.cofs.2020.10.020

Dong, J., & St. Jeor, V. L. (2017). Food Microstructure Techniques. En S. Nielsen (Ed.), Food Analysis (p. 557–570). Springer. doi: 10.1007/978-3-319-45776-5_32

Du, X., Zhang, Y., Pan, X., Meng, F., You, J., & Wang, Z. (2019). Preparation and properties of modified porous starch/carbon black/natural rubber composites. Composites Part B: Engineering, 156: 1–7. doi: 10.1016/j.compositesb.2018.08.033

Espinel Villacrés, R. A., Flores, S. K., & Gerschenson, L. N. (2014). Biopolymeric antimicrobial films: Study of the influence of hydroxypropyl methylcellulose, tapioca starch and glycerol contents on physical properties. Materials Science and Engineering C, 36(1): 108–117. doi: 10.1016/j.msec.2013.11.043

European Bioplastics. (2021). Bioplastics market development update 2021. Recuperado de https://www.european-bioplastics.org/market/

EuropeanBioplastics. (2018). What are bioplastics? Recuperado de https://www.european-bioplastics.org/bioplastics/

Falguera, V., Quintero, J. P., Jiménez, A., Muñoz, J. A., & Ibarz, A. (2011). Edible films and coatings: Structures, active functions and trends in their use. Trends in Food Science and Technology, 22(6): 292–303. doi: 10.1016/j.tifs.2011.02.004

Flores, S. K., Costa, D., Yamashita, F., Gerschenson, L. N., & Grossmann, M. V. (2010). Mixture design for evaluation of potassium sorbate and xanthan gum effect on properties of tapioca starch films obtained by extrusion. Materials Science and Engineering C, 30(1): 196–202. doi: 10.1016/j.msec.2009.10.001

Fonseca, C., Huarachi, E., Chura, W., & Cotrado, G. (2008). Guía de las buenas prácticas del procesamiento para la producción artesanal de la Tunta. Puno, Perú: Proyecto INCOPA. Recuperado de https://cipotato.org/wp-content/uploads/2014/09/004295.pdf

Fonseca, C., & Ordinola, M. (2011). Mejorando la competitividad de la agroindustria rural: el caso de la tunta en el altiplano peruano. Lima, Perú: Centro Internacional de la Papa (CIP), Proyecto INCOPA, Alianza Institucional de la Papa y Derivados, Iniciativa Papa Andina, Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperacion (COSUDE). doi: 10.4160/9789290604129

Funami, T., Kataoka, Y., Omoto, T., Goto, Y., Asai, I., & Nishinari, K. (2005). Effects of non-ionic polysaccharides on the gelatinization and retrogradation behavior of wheat starch. Food Hydrocolloids, 19(1): 1–13. doi: 10.1016/j.foodhyd.2004.04.024

Gennadios, A. (2004). Edible films and coatings from proteins. En R. Y. Yada (Ed.), Proteins in Food Processing (p. 442–467). Woodhead Publishing. doi: 10.1533/9781855738379.3.442

Gómez, R., Roca, W., Ordinola, M., Manrique, K., Julca, P., & Tapia, M. (2008). Papas nativas del Perú: catálogo de variedades y usos gastronómicos. Lima, Perú: Ministerio de Agricultura.

Gonçalves de Moura, I., Vasconcelos de Sá, A., Lemos Machado Abreu, A. S., & Alves Machado, A. V. (2017). Bioplastics from agro-wastes for food packaging applications. En A. Mihai Grumezescu (Ed.), Food Packaging*:* Nanotechnology in the Agri-Food Industry, Volume 7 (p. 223-262). Elsevier. doi: 10.1016/b978-0-12-804302-8.00007-8

Gontard, N., Duchez, C., Cuq, J., & Guilbert, S. (1994). Edible composite films of wheat gluten and lipids: water vapour permeability and other physical properties. International Journal of Food Science & Technology, 29(1): 39–50. doi: 10.1111/j.1365-2621.1994.tb02045.x

Gontard, N., Guilbert, S., & Cuq, J.-L. (1992). Edible Wheat Gluten Films: Influence of the Main Process Variables on Film Properties using Response Surface Methodology. Journal of Food Science, 57(1): 190–195. doi: 10.1111/j.1365-2621.1992.tb05453.x

González, A., & Alvarez Igarzabal, C. I. (2013). Soy protein - Poly (lactic acid) bilayer films as biodegradable material for active food packaging. Food Hydrocolloids, 33(2): 289–296. doi: 10.1016/j.foodhyd.2013.03.010

Goyeneche, R., Agüero, M. v., Roura, S., & di Scala, K. (2014). Application of citric acid and mild heat shock to minimally processed sliced radish: Color evaluation. Postharvest Biology and Technology, 93: 106–113. doi: 10.1016/j.postharvbio.2014.02.011

Guilbert, S., & Gontard, N. (2005). Agro-polymers for edible and biodegradable films. Review of agricultural polymeric materials, physical and mechanical characteristics. Innovations in Food Packaging, 263–276. doi: 10.1016/B978-012311632-1/50048-6

Han, J. H. (2014). Edible Films and Coatings: A Review. En J. H. Han (Ed.), Innovations in Food Packaging: Second Edition (p. 213-255). Elsevier. doi: 10.1016/B978-0-12-394601-0.00009-6

Han, J. H., & Floros, J. D. (1997). Casting antimicrobial packaging films and measuring their physical properties and antimicrobial activity. Journal of Plastic Film and Sheeting, 13(4): 287–298. doi: 10.1177/875608799701300405

Havstad, M. R. (2020). Biodegradable Plastics. En T. M. Letcher (Ed.), Plastic Waste and Recycling: Environmental Impact, Societal Issues, Prevention, and Solutions (p. 97-129). Elsevier. doi:10.1016/B978-0-12-817880-5.00005-0

He, J., Wang, Y., Cui, S., Gao, Y., & Wang, S. (2010). Structure and properties of silk fibroin/carboxymethyl chitosan blend films. Polymer Bulletin, 65(4): 395–409. doi: 10.1007/s00289-010-0293-y

Herrera, A. (2018). Diseño de empaques multimediales con materiales biodegradables para proteger desde la industria gráfica el medio ambiente. Revista Tecnología y Productividad, 4(4): 111–132. Recuperado de https://revistas.sena.edu.co/index.php/rtyp/article/view/2336

Homez-Jara, A., Daza, L. D., Aguirre, D. M., Muñoz, J. A., Solanilla, J. F., & Váquiro, H. A. (2018). Characterization of chitosan edible films obtained with various polymer concentrations and drying temperatures. International Journal of Biological Macromolecules, 113: 1233–1240. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2018.03.057

Iahnke, A. O. e. S., Costa, T. M. H., Rios, A. de O., & Flôres, S. H. (2015). Residues of minimally processed carrot and gelatin capsules: Potential materials for packaging films. Industrial Crops and Products, 76: 1071–1078. doi: 10.1016/j.indcrop.2015.08.025

Ingrassia, R., Bea, L. L., Hidalgo, M. E., & Risso, P. H. (2019). Microstructural and textural characteristics of soy protein isolate and tara gum cold-set gels. LWT: Food Science and Technology, 113. doi: 10.1016/j.lwt.2019.108286

Instituto Nacional de Calidad. (2019). Tubérculos procesados. Tunta. Requisitos. 2ª Edición. NTP 011.400:2019.

International Potato Center. (2017). Papas Nativas. Lima, Perú: CIP. Recuperado de https://hdl.handle.net/10568/87955

International Potato Center. (2022). Papas Nativas. Lima, Perú: CIP. Recuperado de https://cipotato.org/es/potato/native-potato-varieties/

ISO 17088. (2021). Plastics-Organic Recycling-Specifications for compostable plastics. Recuperado de https://www.iso.org/standard/74994.html

ISO 20200. (2023). Determination of the degree of disintegration of plastic materials under composting conditions in a laboratory-scale test. Recuperado de https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/c3bc5a54-59a8-4965-878e-

Jaramillo, C. M., Gutiérrez, T. J., Guyanés, S., Bernal, C., & Famá, L. (2016). Biodegradability and plasticizing effect of yerba mate extract on cassava starch edible films. Carbohydrate Polymers, 151: 150–159. doi: 10.1016/j.carbpol.2016.05.025

Jiménez, A., Fabra, M. J., Talens, P., & Chiralt, A. (2012a). Edible and Biodegradable Starch Films: A Review. Food and Bioprocess Technology, 5(6): 2058–2076. doi: 10.1007/s11947-012-0835-4

Jiménez, A., Fabra, M. J., Talens, P., & Chiralt, A. (2012b). Influence of hydroxypropylmethylcellulose addition and homogenization conditions on properties and ageing of corn starch-based films. Carbohydrate Polymers, 89(2): 676–686. doi: 10.1016/j.carbpol.2012.03.075

Jõgi, K., & Bhat, R. (2020). Valorization of food processing wastes and by-products for bioplastic production. Sustainable Chemistry and Pharmacy, 18. doi: 10.1016/j.scp.2020.100326

Kanmani, P., & Lim, S. T. (2013). Development and characterization of novel probiotic-residing pullulan/starch edible films. Food Chemistry, 141(2): 1041–1049. doi: 10.1016/j.foodchem.2013.03.103

Karaman, S., Kesler, Y., Gosal, M., Dogan, M., & Kayacier, A. (2014). Rheological and some physicochemical properties of selected hydrocolloids and their interactions with guar gum: Characterization using principal component analysis and viscous synergism index. International Journal of Food Properties, 17(8): 1655–1667. doi: 10.1080/10942912.2012.675612

Kaur, A., Singh, N., Ezekiel, R., & Guraya, H. S. (2007). Physicochemical, thermal and pasting properties of starches separated from different potato cultivars grown at different locations. Food Chemistry, 101(2): 643–651. doi: 10.1016/j.foodchem.2006.01.054

Kaur, L., Singh, J., Singh, H., & McCarthy, O. J. (2008). Starch-cassia gum interactions: A microstructure - Rheology study. Food Chemistry, 111(1): 1–10. doi: 10.1016/j.foodchem.2008.03.027

Kim, S. R. B., Choi, Y. G., Kim, J. Y., & Lim, S. T. (2015). Improvement of water solubility and humidity stability of tapioca starch film by incorporating various gums. LWT: Food Science and Technology, 64(1): 475–482. doi: 10.1016/j.lwt.2015.05.009

Kizil, R., Irudayaraj, J., & Seetharaman, K. (2002). Characterization of irradiated starches by using FT-Raman and FTIR spectroscopy. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 50(14): 3912–3918. doi: 10.1021/jf011652p

Kumar, S., Singh, P., Gupta, S. K., Ali, J., & Baboota, S. (2020). Biodegradable and Recyclable Packaging Materials: A Step Towards a Greener Future. En S. Hashmi & I.

Ahmed Choudhury (Eds.), Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials 5 (p. 328-337). Elsevier. doi: 10.1016/b978-0-12-803581-8.10934-8

Leite, T. D., Nicoleti, J. F., Penna, A. L. B., & Franco, C. M. L. (2012). Effect of addition of different hydrocolloids on pasting, thermal, and rheological properties of cassava starch. Food Science and Technology, 32(3): 579–587. doi: 10.1590/s0101-20612012005000074

Li, H., Gao, X., Wang, Y., Zhang, X., & Tong, Z. (2013). Comparison of chitosan/starch composite film properties before and after cross-linking. International Journal of Biological Macromolecules, 52(1): 275–279. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2012.10.016

Liu, D., & Zhang, L. (2006). Structure and properties of soy protein plastics plasticized with acetamide. Macromolecular Materials and Engineering, 291(7): 820–828. doi: 10.1002/mame.200600098

Lozano-Navarro, J. I., Díaz-Zavala, N. P., Velasco-Santos, C., Melo-Banda, J. A., Páramo-García, U., Paraguay-Delgado, F., García-Alamilla, R., Martínez-Hernández, A. L., & Zapién-Castillo, S. (2018). Chitosan-starch films with natural extracts: Physical, chemical, morphological and thermal properties. Materials, 11(1): 1–20. doi: 10.3390/ma11010120

Ma, Q., Hu, D., Wang, H., & Wang, L. (2016). Tara gum edible film incorporated with oleic acid. Food Hydrocolloids, 56: 127–133. doi: 10.1016/j.foodhyd.2015.11.033

Maran, J. P., Sivakumar, V., Thirugnanasambandham, K., & Sridhar, R. (2014). Degradation behavior of biocomposites based on cassava starch buried under indoor soil conditions. Carbohydrate Polymers, 101(1): 20–28. doi: 10.1016/j.carbpol.2013.08.080

Martínez, P., Betalleluz-Pallardel, I., Cuba, A., Peña, F., Cervantes-Uc, J. M., Uribe-Calderón, J. A., & Velezmoro, C. (2022). Effects of natural freeze-thaw treatment on structural, functional, and rheological characteristics of starches isolated from three bitter potato cultivars from the Andean region. Food Hydrocolloids, 132. doi: 10.1016/j.foodhyd.2022.107860

Martins, J. T., Cerqueira, M. A., Bourbon, A. I., Pinheiro, A. C., Souza, B. W. S., & Vicente, A. A. (2012). Synergistic effects between κ-carrageenan and locust bean gum on physicochemical properties of edible films made thereof. Food Hydrocolloids, 29(2): 280–289. doi: 10.1016/j.foodhyd.2012.03.004

Martucci, J. F., & Ruseckaite, R. A. (2009). Tensile properties, barrier properties, and biodegradation in soil of compression - molded gelatin-dialdehyde starch films. Journal of Applied Polymer Science, 112(4): 2166–2178. doi: 10.1002/app.29695

Marvdashti, L. M., Koocheki, A., & Yavarmanesh, M. (2017). Alyssum homolocarpum seed gum-polyvinyl alcohol biodegradable composite film: Physicochemical, mechanical, thermal and barrier properties. Carbohydrate Polymers, 155: 280–293. doi: 10.1016/j.carbpol.2016.07.123

Mathew, S., Brahmakumar, M., & Abraham, T. (2006). Microstructural Imaging and Characterization of the Mechanical, Chemical, Thermal, and Swelling Properties of Starch-Chitosan Blend Films. Biopolymers, 82(2): 176–187. doi: 10.1002/ bip.20480

Mathur, N. K. (2012). Industrial galactomannan polysaccharides. CRC Press. doi: 10.1201/b11107

Melo, C. P. B., Grossmann, M. V. E., Yamashita, F., Youssef, E. Y., Dall'Antônia, L. H., & Mali, S. (2011). Effect of Manufacturing Process and Xanthan Gum Addition on the Properties of Cassava Starch Films. Journal of Polymers and the Environment, 19(3): 739–749. doi: 10.1007/s10924-011-0325-1

Meritaine da Rocha, de Souza, M. M., & Prentice, C. (2018). Biodegradable Films: An Alternative Food Packaging. En A. Mihai Grumezescu & A. Maria Holban (Eds.), Food Packaging and Preservation (p. 307-342). Elsevier. doi: 10.1016/b978-0-12-811516-9.00009-9

Mirhosseini, H., & Amid, B. T. (2012). A review study on chemical composition and molecular structure of newly plant gum exudates and seed gums. Food Research International, 46(1): 387–398. doi: 10.1016/j.foodres.2011.11.017

Mohamed, M. A., Jaafar, J., Ismail, A. F., Othman, M. H. D., & Rahman, M. A. (2017). Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy. En N. Hilal, A. F. Ismail, T. Matsuura & D. Oatley-Radcliffe (Eds.), Membrane Characterization (p. 3-29). Elsevier. doi: 10.1016/B978-0-444-63776-5.00001-2

Mondragón, P. (2020). Principios y aplicaciones de la espectroscopía de infrarrojo en el análisis de los alimentos y bebidas. Jalisco, México: Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco A. C. Recuperado de https://ciatej.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1023/720/1/Infrarrojo%20Cap%201.pdf

Moreno, O., Atarés, L., & Chiralt, A. (2015). Effect of the incorporation of antimicrobial/antioxidant proteins on the properties of potato starch films. Carbohydrate Polymers, 133: 353–364. doi: 10.1016/j.carbpol.2015.07.047

Mortensen, A., Aguilar, F., Cerebella, R., di Domenico, A., Frutos, M. J., Galtier, P., … Dusemund, B. (2017). Re-evaluation of tara gum (E 417) as a food additive. EFSA Journal, 15(6). doi: 10.2903/j.efsa.2017.4863

Mostafavi, F. S., Kadkhodaee, R., Emadzadeh, B., & Koocheki, A. (2016). Preparation and characterization of tragacanth-locust bean gum edible blend films. Carbohydrate Polymers, 139: 20–27. doi: 10.1016/j.carbpol.2015.11.069

Msagati, T. A. M. (2012). Stabilisers, Gums, Thickeners and Gelling Agents as Food Additives. En Chemistry of Food Additives and Preservatives (p. 67–82). John Wiley & Sons. doi: 10.1002/9781118274132.ch3

Nandi, S., & Guha, P. (2018). Modelling the effect of guar gum on physical, optical, barrier and mechanical properties of potato starch based composite film. Carbohydrate Polymers, 200: 498–507. doi: 10.1016/j.carbpol.2018.08.028

Nawab, A., Alam, F., Haq, M. A., & Hasnain, A. (2016). Biodegradable film from mango kernel starch: Effect of plasticizers on physical, barrier, and mechanical properties. Starch/Staerke, 68(9–10): 919–928. doi: 10.1002/star.201500349

Nawab, A., Alam, F., Haq, M. A., Lutfi, Z., & Hasnain, A. (2017). Mango kernel starch-gum composite films: Physical, mechanical and barrier properties. International Journal of Biological Macromolecules, 98: 869–876. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2017.02.054

Nuvoli, L., Conte, P., Fadda, C., Reglero Ruiz, J. A., García, J. M., Baldino, S., & Mannu, A. (2021). Structural, thermal, and mechanical properties of gelatin-based films integrated with tara gum. Polymer, 214. doi: 10.1016/j.polymer.2020.123244

Ordinola, M., Devaux, A., Manrique, K., Fonseca, C., & Thomann, A. (2009). Generando innovaciones para el desarrollo competitivo de la papa en el Peru. Lima, Perú: Centro Internacional de la Papa. Recuperado de https://cipotato.org/wp-content/uploads/publication%20files/books/004776.pdf

Ortega-Toro, R., Jiménez, A., Talens, P., & Chiralt, A. (2014). Properties of starch-hydroxypropyl methylcellulose-based films obtained by compression molding. Carbohydrate Polymers, 109: 155–165. doi: 10.1016/j.carbpol.2014.03.059

Otálora, M. C., Wilches-Torres, A., & Gómez Castaño, J. A. (2021). Preparation and physicochemical properties of edible films from gelatin and Andean potato (Solanum tuberosum Group Phureja) starch. International Journal of Food Science and Technology, 56(2): 838–846. doi: 10.1111/ijfs.14727

Ozdemir, M., & Floros, J. D. (2008). Optimization of edible whey protein films containing preservatives for water vapor permeability, water solubility and sensory characteristics. Journal of Food Engineering, 86(2): 215–224. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2007.09.028

Peña, E. F. (2017). Extracción y caracterización fisicoquímica de almidones de cinco variedades de papas nativas procedentes de Ilave, Puno (Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria La Molina). Recuperada de https://repositorio.lamolina.edu.pe/items/8aa332db-ae26-4779-b62c-aa44f6601fab

Pérez, L. M., Picarilla, G. N., Delorenzi, N. J., & Verdini, R. A. (2016). Effect of different combinations of glycerol and/or trehalose on physical and structural properties of whey protein concentrate-based edible films. Food Hydrocolloids, 56: 352–359. doi: 10.1016/j.foodhyd.2015.12.037

Phillips, G. O., & Phillips, A. O. (2011). Gum arabic and other exudate gums. En P. Williams (Ed.), Renewable Resources for Functional Polymers and Biomaterials (p. 166–185). RSC Publishing. doi: 10.1039/9781849733519-00166

Prajapati, V. D., Jani, G. K., Moradiya, N. G., Randeria, N. P., Nagar, B. J., Naikwadi, N. N., & Variya, B. C. (2013). Galactomannan: A versatile biodegradable seed polysaccharide. International Journal of Biological Macromolecules, 60: 83–92. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2013.05.017

Proexpansión. (2011). Cambios del sector papa en el Peru en la última década: Los aportes del proyecto Innovación y Competitividad de la Papa (INCOPA). Lima, Perú: Centro Internacional de la Papa. doi: 10.4160/9789290604112

Ramírez López, S. (2016). Amido e farinha de cañihua (Chenopodium pallidicaule): extração, caracterização e desenvolvimento de filmes biodegradáveis (Tesis de maestría, Universidade de São Paulo). Recuperada de https://repositorio.usp.br/item/002773159

Reddy, N., & Yang, Y. (2010). Citric acid cross-linking of starch films. Food Chemistry, 118(3): 702–711. doi: 10.1016/j.foodchem.2009.05.050

Rodriguez-Saona, L., Ayvaz, H., & Wehling, R. L. (2017). Infrared and Raman Spectroscopy. En S. Nielsen (Ed.), Food Analysis (p. 107–127). Springer. doi: 10.1007/978-3-319-45776-5_8

Ross, G., Ross, S., & Tighe, B. J. (2017). Bioplastics: New Routes, New Products. En M. Gilbert (Ed.), Brydson's Plastics Materials (p. 631-652). Elsevier. doi: 10.1016/B978-0-323-35824-8.00023-2

Royer, S. J., Ferrón, S., Wilson, S. T., & Karl, D. M. (2018). Production of methane and ethylene from plastic in the environment. PLoS ONE, 13(8). doi: 10.1371/journal.pone.0200574

Rydz, J., Musioł, M., Zawidlak-w, B., & Sikorska, W. (2018). Present and Future of Biodegradable Polymers for Food Packaging Applications. En A. M. Grumezescu & A. M. Holban (Eds.), Biopolymers for Food Design (p. 431-467). Academic Press. doi: 10.1016/B978-0-12-811449-0/00014-1

Saberi, B., Chockchaisawasdee, S., Golding, J., Scarlett, C., & Stathopoulos, C. (2017). Physical and mechanical properties of a new edible film made of pea starch and guar gum as affected by glycols, sugars and polyols. International Journal of Biological Macromolecules, 104: 345–359. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2017.06.051

Saberi, B., Thakur, R., Bhuyan, D. J., Vuong, Q. V, Chockchaisawasdee, S., Golding, J. B., Scarlett, C. J., & Stathopoulos, C. E. (2016). Development of edible blend films with good mechanical and barrier properties from pea starch and guar gum. Starch/Staerke, 69 (1–2): 1–37. doi: 10.1002/star.201600227

Saberi, B., Thakur, R., Vuong, Q. v., Chockchaisawasdee, S., Golding, J. B., Scarlett, C. J., & Stathopoulos, C. E. (2016). Optimization of physical and optical properties of biodegradable edible films based on pea starch and guar gum. Industrial Crops and Products, 86: 342–352. doi: 10.1016/j.indcrop.2016.04.015

Salazar, M., Judith, Z., & Valecillos, H. (2008). Evaluación del rendimiento y características de calidad de trece clones avanzados de papa (Solanum tuberosum L.). Agricultura Andina, 14(1):101–117. Recuperado de http://www.saber.ula.ve/handle/123456789/29373

Sam, S. T., Nuradibah, M. A., Chin, K. M., & Hani, N. (2015). Current Application and Challenges on Packaging Industry Based on Natural Polymer Blending. En O. Olatunji (Ed.), Natural Polymers: Industry Techniques and Applications (p. 163–184). Springer Cham. doi: 10.1007/978-3-319-26414-1

Sapper, M., Talens, P., & Chiralt, A. (2019). Improving functional properties of cassava starch-based films by incorporating xanthan, gellan, or pullulan gums. International Journal of Polymer Science, 2019(6): 1–9. doi: 10.1155/2019/5367164

Schirmer, M., Höchstötter, A., Jekle, M., Arendt, E., & Becker, T. (2013). Physicochemical and morphological characterization of different starches with variable amylose/amylopectin ratio. Food Hydrocolloids, 32(1): 52–63. doi: 10.1016/j.foodhyd.2012.11.032

Seligra, P. G., Jaramillo, C. M., Famá, L., & Goyanes, S. (2016). Biodegradable and non-retrogradable eco-films based on starch-glycerol with citric acid as crosslinking agent. Carbohydrate Polymers, 138: 66–74. doi: 10.1016/j.carbpol.2015.11.041

Shaikh, S., Yaqoob, M., & Aggarwal, P. (2021). An overview of biodegradable packaging in food industry. Current Research in Food Science, 4: 503–520. doi: 10.1016/j.crfs.2021.07.005

Shrestha, A. K., & Halley, P. J. (2014). Starch Modification to Develop Novel Starch-Biopolymer Blends: State of Art and perspectives. En P. J. Halley & L. Avérous (Eds.), Starch Polymers: From Genetic Engineering to Green Applications (p. 105-143). Elsevier. doi: 10.1016/B978-0-444-53730-0.00022-1

SIEA- Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego. (2022). Dashboard de Estadísticas de Producción Agraria y Mercados. Recuperado de https://siea.midagri.gob.pe/portal/siea_bi/index.html

Sierra y Selva Exportadora. (2020). Análisis de mercado de Papa. Recuperado de https://repositorio.sierraexportadora.gob.pe/handle/SSE/178

Silva, S. S., Rodrigues, L. C., Fernandes, E. M., & Reis, R. L. (2020). Fundamentals on biopolymers and global demand. En M. Agostini de Moraes, C. Ferreira da Silva & R. Silveira Vieira (Eds.), Biopolymer Membranes and Films (p. 3-34). Elsevier. doi: 10.1016/b978-0-12-818134-8.00001-8

Singh, N., Singh, J., Kaur, L., Sodhi, N. S., & Gill, B. S. (2003). Morphological, thermal and rheological properties of starches from different botanical sources. Food Chemistry, 81 (2): 219–231. doi: 10.1016/S0308-8146(02)00416-8

Singh, R., & Barreca, D. (2020). Analysis of gums and mucilages. Recent Advances in Natural Products Analysis, 663–676. doi: 10.1016/B978-0-12-816455-6.00021-4

Singh, T. P., Chatli, M. K., & Sahoo, J. (2015). Development of chitosan based edible films: process optimization using response surface methodology. Journal of Food Science and Technology, 52(5): 2530–2543. doi: 10.1007/s13197-014-1318-6

Siracusa, V., Rocculi, P., Romani, S., & Rosa, M. D. (2008). Biodegradable polymers for food packaging: a review. Trends in Food Science and Technology, 19(12), 634–643. doi: 10.1016/j.tifs.2008.07.003

Squeo, G., De Angelis, D., Leardi, R., Summo, C., & Caponio, F. (2021). Background, applications and issues of the experimental designs for mixture in the food sector. Foods, 10 (5). doi: 10.3390/foods10051128

Srivastava, M., & Kapoor, V. P. (2005). Seed galactomannans: An overview. Chemistry and Biodiversity, 2(3): 295–317. doi: 10.1002/cbdv.200590013

Su, J. F., Yuan, X. Y., Huang, Z., Wang, X. Y., Lu, X. Z., Zhang, L. D., & Wang, S. B. (2012). Physicochemical properties of soy protein isolate/carboxymethyl cellulose blend films crosslinked by Maillard reactions: Color, transparency and heat-sealing ability. Materials Science and Engineering: C, 32(1): 40–46. doi: 10.1016/j.msec.2011.09.009

Sukhija, S., Singh, S., & Riar, C. S. (2016). Analyzing the effect of whey protein concentrate and psyllium husk on various characteristics of biodegradable film from lotus (Nelumbo nucifera) rhizome starch. Food Hydrocolloids, 60: 128–137. doi: 10.1016/j.foodhyd.2016.03.023

Suriyatem, R. starch-based, Auras, R. A., & Rachtanapun, P. (2018). Improvement of mechanical properties and thermal stability of biodegradable rice starch–based films blended with carboxymethyl chitosan. Industrial Crops and Products, 122: 37–48. doi: 10.1016/j.indcrop.2018.05.047

Thakur, R., Pristijono, P., Scarlett, C. J., Bowyer, M., Singh, S. P., & Vuong, Q. V. (2019). Starch-based films: Major factors affecting their properties. International Journal of Biological Macromolecules, 132: 1079–1089. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2019.03.190

Tomoda, B. T., Yassue-Cordeiro, P. H., Ernesto, J. V., Lopes, P. S., Péres, L. O., da Silva, C. F., & de Moraes, M. A. (2020). Characterization of biopolymer membranes and films: Physicochemical, mechanical, barrier, and biological properties. En M. Agostini

de Moraes, C. Ferreira da Silva & R. Silveira Vieira (Eds.), Biopolymer Membranes and Films (p. 67–95). Elsevier. doi: 10.1016/b978-0-12-818134-8.00003-1

Vaclavick, V. (2002). Fundamentos de ciencia de los alimentos. Editorial Acribia.

Vázquez, A., Foresti, M. L., & Cyras, V. (2011). Production, Chemistry and Degradation of Starch-Based Polymers. En D. Plackett (Ed.), Biopolymers: New Materials for Sustainable Films and Coatings (p. 15–42). John Wiley & Sons. doi: 10.1002/9781119994312.ch2

Veiga-Santos, P., Suzuki, C. K., Cereda, M. P., & Scamparini, A. R. P. (2005). Microstructure and color of starch-gum films: Effect of gum deacetylation and additives. Part 2. Food Hydrocolloids, 19(6): 1064–1073. doi: 10.1016/j.foodhyd.2005.02.007

Wang, K., Wang, W., Ye, R., Liu, A., Xiao, J., Liu, Y., & Zhao, Y. (2017). Mechanical properties and solubility in water of corn starch-collagen composite films: Effect of starch type and concentrations. Food Chemistry, 216: 209-216. doi: 10.1016/j.foodchem.2016.08.048

Wang, K., Wang, W., Ye, R., Xiao, J., Liu, Y., Ding, J., Zhang, S., & Liu, A. (2017). Mechanical and barrier properties of maize starch-gelatin composite film: effects of amylose content. Journal of the Science of Food and Agriculture, 97(11): 3613–3622. doi: doi:10.1002/jsfa.8220

Wielinga, W. C. (2009). Galactomannans. En G.O. Phillips & P.A. Williams (Eds.), Handbook of Hydrocolloids: Second Edition (p. 228–251). Woodhead Publishing. doi: 10.1533/9781845695873.228

Wihodo, M., & Moraru, C. I. (2013). Physical and chemical methods used to enhance the structure and mechanical properties of protein films: A review. Journal of Food Engineering, 114(3): 292–302. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2012.08.021

Wu, C., & Zhou, X. (2018). The overview of functional starch. En Zhengyu Jin (Ed.), Functional Starch and Applications in Food (p. 1–26). Springer Singapore. doi: 10.1007/978-981-13-1077-5

Wu, H., Lei, Y., Lu, J., Zhu, R., Xiao, D., Jiao, C., Xia, R., Zhang, Z., Shen, G., Liu, Y., Li, S., & Li, M. (2019). Effect of citric acid induced crosslinking on the structure and properties of potato starch/chitosan composite films. Food Hydrocolloids, 97. doi: 10.1016/j.foodhyd.2019.105208

Wu, Y., Ding, W., Jia, L., & He, Q. (2015). The rheological properties of tara gum (Caesalpinia spinosa). Food Chemistry, 168: 366–371. doi: 10.1016/j.foodchem.2014.07.083

Xiaoqing, N., Qianyun, M., Shuiling, L., Wenxiu, W., Yajuan, M., Hongqian, Z., Jianfeng, S., & Jie, W. (2021). Preparation and Characterization of Biodegradable Composited Films Based on Potato Starch/Glycerol/Gelatin. Journal of Food Quality, 2021(1). doi:10.1155/2021/6633711

Xu, X., Li, B., Kennedy, J. F., Xie, B. J., & Huang, M. (2007). Characterization of konjac glucomannan-gellan gum blend films and their suitability for release of nisin incorporated therein. Carbohydrate Polymers, 70(2): 192–197. doi:10.1016/j.carbpol.2007.03.017

Yu, S., Zhang, Y., Li, H., Wang, Y., Gong, C., Liu, X., Zheng, X., & Kopparapu, N. K. (2015). Effect of freeze-thawing treatment on the microstructure and thermal properties of non-waxy corn starch granule. Starch/Staerke, 67(11–12):989–1001. doi: 10.1002/star.201500109

Zamudio-Flores, P. B., & Bello-Pérez, L. A. (2013). Elaboración y caracterizacion de peliculas de glicoproteinas obtenidas mediante reacción de Maillard utilizando almidón acetilado y aislado proteico de suero lácteo. Revista Mexicana de Ingeniería Química, 12(3):401–413. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/pdf/rmiq/v12n3/v12n3a4.pdf

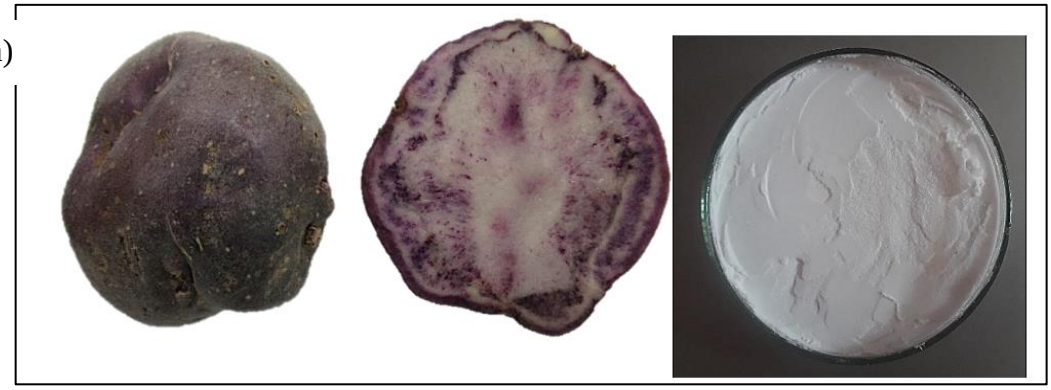
Zhang, Y., Rempel, C., & McLaren, D. (2014). Thermoplastic Starch. En J. H. Han (Ed.), Innovations in Food Packaging: Second Edition (p. 391-412). Academic Press. doi:10.1016/B978-0-12-394601-0.00016-3

Zhou, H., Wang, C., Shi, L., Chang, T., Yang, H., & Cui, M. (2014). Effects of salts on physicochemical, microstructural and thermal properties of potato starch. Food Chemistry, 156: 137–143. doi: 10.1016/j.foodchem.2014.02.015

VIII. ANEXOS

ANEXO 1: IMÁGENES DE LA MATERIA PRIMA

a)



b)



Imagen de la variedad Ocucuri negra: a) papa y b) tunta

FUENTE: Cuba (2020)



Imagen de la goma de tara

ANEXO 2: SOLUCIONES ENCONTRADAS PARA LA OPTIMIZACIÓN NUMÉRICA DE LA MEZCLA DE ALMIDÓN – GOMA DE TARA

Tabla A.1: Soluciones encontradas para la mezcla almidón de papa – goma de tara (AP-GT)

Número	Almidón de papa (AP)	Goma de tara (GT)	Fuerza de Tracción (FT)	Alargamiento a la rotura (AR)	Permeabilidad al vapor de agua (PVA)	Deseabilidad
1	98.827	1.173	4.464	20.579	6.352	0.711
2	100.000	0.000	4.760	13.840	6.678	0.678

Tabla A.2: Soluciones encontradas para la mezcla almidón de tunta – goma de tara (AT-GT)

Número	Almidón de tunta (AT)	Goma de tara (GT)	Fuerza de Tracción (FT)	Alargamiento a la rotura (AR)	Permeabilidad al vapor de agua (PVA)	Deseabilidad
1	90	10	9.311	9.394	5.241	0.941
2	100	0	5.993	20.016	6.483	0.293

ANEXO 3: ANOVA Y TUKEY PARA PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS

Tabla B.1: ANOVA para el espesor por TRATAMIENTO

Fuente	*Suma de Cuadrados*	*Gl*	*Cuadro Medio*	*Razón-F*	*P-Valor*
Entre grupos	0.00000457143	1	0.00000457143	0.55	0.4707
Intra grupos	0.0000988571	12	0.0000082381		
Total (Corr.)	0.000103429	13			

Pruebas de Múltiple Rangos para espesor por tratamiento

Método: 95.0 porcentaje Tukey HSD

tratamiento	*Casos*	*Media*	*Grupos Homogéneos*
AP.GT	7	0.0728571	X
AT.GT	7	0.074	X

Contraste	*Sig.*	*Diferencia*	*+/- Límites*
AP.GT – AT.GT		-0.00114286	0.00334272

* indica una diferencia significativa.

Tabla B.2: ANOVA para el gramaje por TRATAMIENTO

Fuente	*Suma de Cuadrados*	*Gl*	*Cuadro Medio*	*Razón-F*	*P-Valor*
Entre grupos	40.3004	1	40.3004	0.55	0.4981
Intra grupos	291.044	4	72.761		
Total (Corr.)	331.345	5			

Pruebas de Múltiple Rangos para espesor por tratamiento

Método: 95.0 porcentaje Tukey HSD

tratamiento	*Casos*	*Media*	*Grupos Homogéneos*
AT.GT	3	201.217	X
AP.GT	3	196.033	X

Contraste	*Sig.*	*Diferencia*	*+/- Límites*
AP.GT – AT.GT		-5.18333	19.3372

* indica una diferencia significativa.

Tabla B.3: ANOVA para la densidad por TRATAMIENTO

Fuente	*Suma de Cuadrados*	*Gl*	*Cuadro Medio*	*Razón-F*	*P-Valor*
Entre grupos	1222.37	1	1222.37	0.09	0.7796
Intra grupos	54590.2	4	13647.5		
Total (Corr.)	55812.6	5			

Pruebas de Múltiple Rangos para densidad por tratamiento

Método: 95.0 porcentaje Tukey HSD

tratamiento	*Casos*	*Media*	*Grupos Homogéneos*
AT.GT	3	2719.17	X
AP.GT	3	2690.62	X

Contraste	*Sig.*	*Diferencia*	*+/- Límites*
AP.GT – AT.GT		-28.5467	264.833

* indica una diferencia significativa.

Tabla B.4. : ANOVA para el Humedad por TRATAMIENTO

Fuente	*Suma de Cuadrados*	*Gl*	*Cuadro Medio*	*Razón-F*	*P-Valor*
Entre grupos	0.564267	1	0.564267	24.89	0.0075
Intra grupos	0.0906667	4	0.0226667		
Total (Corr.)	0.654933	5			

Pruebas de Múltiple Rangos para Humedad por tratamiento

Método: 95.0 porcentaje Tukey HSD

Tratamiento	*Casos*	*Media*	*Grupos Homogéneos*
AP.GT	3	17.71	X
AT.GT	3	18.3233	X

Contraste	*Sig.*	*Diferencia*	*+/- Límites*
AP.GT – AT.GT	*	-0.613333	0.341302

* indica una diferencia significativa.

Tabla B.5.: ANOVA para el Solubilidad en Agua por TRATAMIENTO

Fuente	*Suma de Cuadrados*	*Gl*	*Cuadro Medio*	*Razón-F*	*P-Valor*
Entre grupos	84.6002	1	84.6002	51.39	0.0020
Intra grupos	6.58473	4	1.64618		
Total (Corr.)	91.1849	5			

Pruebas de Múltiple Rangos para Solubilidad en Agua por tratamiento

Método: 95.0 porcentaje Tukey HSD

tratamiento	*Casos*	*Media*	*Grupos Homogéneos*
AT.GT	3	23.4233	X
AP.GT	3	30.9333	X

Contraste	*Sig.*	*Diferencia*	*+/- Límites*
AP.GT – AT.GT	*	7.51	2.9086

* indica una diferencia significativa.

Tabla B.6.: ANOVA para el Grado de Hinchamiento por TRATAMIENTO

Fuente	*Suma de Cuadrados*	*Gl*	*Cuadro Medio*	*Razón-F*	*P-Valor*
Entre grupos	13320.8	1	13320.8	41.11	0.0030
Intra grupos	1295.99	4	323.997		
Total (Corr.)	14616.8	5			

Pruebas de Múltiple Rangos para Grado de Hinchamiento por tratamiento

Método: 95.0 porcentaje Tukey HSD

tratamiento	*Casos*	*Media*	*Grupos Homogéneos*
AT.GT	3	344.697	X
AP.GT	3	438.933	X

Contraste	*Sig.*	*Diferencia*	*+/- Límites*
AP.GT – AT.GT	*	94.2367	40.8052

* indica una diferencia significativa.

ANEXO 4: ANOVA Y TUKEY PARA LAS PROPIEDADES ÓPTICAS

Tabla C.1.: ANOVA para el parámetro de color L* por TRATAMIENTO

Fuente	*Suma de Cuadrados*	*Gl*	*Cuadro Medio*	*Razón-F*	*P-Valor*
Entre grupos	0.00680556	1	0.00680556	0.06	0.8137
Intra grupos	1.89722	16	0.118576		
Total (Corr.)	1.90403	17			

Pruebas de Múltiple Rangos para el parámetro de color L* por tratamiento

Método: 95.0 porcentaje Tukey HSD

tratamiento	*Casos*	*Media*	*Grupos Homogéneos*
AP.GT	9	96.4156	X
AT.GT	9	96.3767	X

Contraste	*Sig.*	*Diferencia*	*+/- Límites*
AP.GT - AT.GT		0.0388889	0.34412

* indica una diferencia significativa.

Tabla C.2.: ANOVA para el parámetro de color a* por TRATAMIENTO

Fuente	*Suma de Cuadrados*	*Gl*	*Cuadro Medio*	*Razón-F*	*P-Valor*
Entre grupos	0.0002	1	0.0002	0.25	0.6239
Intra grupos	0.0128	16	0.0008		
Total (Corr.)	0.013	17			

Pruebas de Múltiple Rangos para el parámetro de color a* por tratamiento

Método: 95.0 porcentaje Tukey HSD

tratamiento	*Casos*	*Media*	*Grupos Homogéneos*
AP.GT	9	0.22	X
AT.GT	9	0.213333	X

Contraste	*Sig.*	*Diferencia*	*+/- Límites*
AP.GT - AT.GT		0.00666667	0.0282655

* indica una diferencia significativa.

Tabla C.3.: ANOVA para el parámetro de color b* por TRATAMIENTO

Fuente	*Suma de Cuadrados*	*Gl*	*Cuadro Medio*	*Razón-F*	*P-Valor*
Entre grupos	0.00245	1	0.00245	0.26	0.6157
Intra grupos	0.1496	16	0.00935		
Total (Corr.)	0.15205	17			

Pruebas de Múltiple Rangos para el parámetro de color b* por tratamiento

Método: 95.0 porcentaje Tukey HSD

tratamiento	*Casos*	*Media*	*Grupos Homogéneos*
AP.GT	9	2.83	X
AT.GT	9	2.85333	X

Contraste	*Sig.*	*Diferencia*	*+/- Límites*
AP.GT - AT.GT		-0.0233333	0.0966311

* indica una diferencia significativa.

Tabla C.4.: ANOVA para el parámetro de color ΔE* por TRATAMIENTO

Fuente	*Suma de Cuadrados*	*Gl*	*Cuadro Medio*	*Razón-F*	*P-Valor*
Entre grupos	0.0206722	1	0.0206722	0.45	0.5131
Intra grupos	0.739089	16	0.0461931		
Total (Corr.)		17			

Pruebas de Múltiple Rangos para el parámetro de color ΔE* por tratamiento

Método: 95.0 porcentaje Tukey HSD

tratamiento	*Casos*	*Media*	*Grupos Homogéneos*
AP.GT	9	0.698889	X
AT.GT	9	0.766667	X

Contraste	*Sig.*	*Diferencia*	*+/- Límites*
AP.GT - AT.GT		-0.0677778	0.214783

* indica una diferencia significativa.

Tabla C.5.: ANOVA para el parámetro de color YI por TRATAMIENTO

Fuente	*Suma de Cuadrados*	*Gl*	*Cuadro Medio*	*Razón-F*	*P-Valor*
Entre grupos	0.00568889	1	0.00568889	0.26	0.6154
Intra grupos	0.346822	10	0.0216764		
Total (Corr.)	0.352511	11			

Pruebas de Múltiple Rangos para el parámetro de color YI por tratamiento

Método: 95.0 porcentaje Tukey HSD

tratamiento	*Casos*	*Media*	*Grupos Homogéneos*
AP.GT	9	4.19444	X
AT.GT	9	4.23	X

Contraste	*Sig.*	*Diferencia*	*+/- Límites*
AP.GT - AT.GT		-0.0355556	0.147131

* indica una diferencia significativa.

Tabla C.6.: ANOVA para el parámetro de color WI por TRATAMIENTO

Fuente	*Suma de Cuadrados*	*Gl*	*Cuadro Medio*	*Razón-F*	*P-Valor*
Entre grupos	0.0107556	1	0.0107556	0.13	0.7243
Intra grupos	1.33582	16	0.0834889		
Total (Corr.)	1.34658	17			

Pruebas de Múltiple Rangos para el parámetro de color WI por tratamiento

Método: 95.0 porcentaje Tukey HSD

tratamiento	*Casos*	*Media*	*Grupos Homogéneos*
AP.GT	6	95.4256	X
AT.GT	6	95.3767	X

Contraste	*Sig.*	*Diferencia*	*+/- Límites*
AP.GT - AT.GT		0.0488889	0.288752

* indica una diferencia significativa.

Tabla C.7.: ANOVA para el valor de transparencia por TRATAMIENTO

Fuente	*Suma de Cuadrados*	*Gl*	*Cuadro Medio*	*Razón-F*	*P-Valor*
Entre grupos	0.101918	1	0.101918	7.61	0.0173
Intra grupos	0.160784	12	0.0133987		
Total (Corr.)	0.262702	13			

Pruebas de Múltiple Rangos para valor de transparencia por tratamiento

Método: 95.0 porcentaje Tukey HSD

tratamiento	*Casos*	*Media*	*Grupos Homogéneos*
AP.GT	5	1.78459	X
AT.GT	9	1.96266	X

Contraste	*Sig.*	*Diferencia*	*+/- Límites*
AP.GT-AT.GT	*	-0.178067	0.140673

* indica una diferencia significativa.

ANEXO 5: ANOVA Y TUKEY PARA LAS PROPIEDADES MECÁNICAS

Tabla D.1.: ANOVA para el valor de fuerza de tracción (FT) por TRATAMIENTO

Fuente	*Suma de Cuadrados*	*Gl*	*Cuadro Medio*	*Razón-F*	*P-Valor*
Entre grupos	47.4891	1	47.4891	96.83	0.0006
Intra grupos	1.96167	4	0.490417		
Total (Corr.)	49.4507	5			

Pruebas de Múltiple Rangos para valor de transparencia por tratamiento

Método: 95.0 porcentaje Tukey HSD

tratamiento	*Casos*	*Media*	*Grupos Homogéneos*
AP.GT	3	5.02	X
AT.GT	3	10.6467	X

Contraste	*Sig.*	*Diferencia*	*+/- Límites*
AP.GT-AT.GT	*	-5.62667	1.58755

* indica una diferencia significativa.

Tabla D.2.: ANOVA para el alargamiento a la rotura (AR) por TRATAMIENTO

Fuente	*Suma de Cuadrados*	*Gl*	*Cuadro Medio*	*Razón-F*	*P-Valor*
Entre grupos	22.388	1	22.388	19.42	0.0116
Intra grupos	4.61227	4	1.15307		
Total (Corr.)	27.0003	5			

Pruebas de Múltiple Rangos para valor de transparencia por tratamiento

Método: 95.0 porcentaje Tukey HSD

tratamiento	*Casos*	*Media*	*Grupos Homogéneos*
AT.GT	3	11.5167	X
AP.GT	3	15.38	X

Contraste	*Sig.*	*Diferencia*	*+/- Límites*
AP.GT-AT.GT	*	3.86333	2.43429

* indica una diferencia significativa.

ANEXO 6: ANOVA Y TUKEY PARA LAS PROPIEDADES BARRERA-PERMEABILIDAD AL VAPOR DE AGUA (PVA)

Tabla E.1.: ANOVA para el valor de PVA por TRATAMIENTO

Fuente	*Suma de Cuadrados*	*Gl*	*Cuadro Medio*	*Razón-F*	*P-Valor*
Entre grupos	1.87042	1	1.87042	6.69	0.0609
Intra grupos	1.11787	4	0.279467		
Total (Corr.)	2.98828	5			

Pruebas de Múltiple Rangos para valor de PVA por tratamiento

Método: 95.0 porcentaje Tukey HSD

tratamiento	*Casos*	*Media*	*Grupos Homogéneos*
AT.GT	3	6.14	X
AP.GT	3	7.25667	X

Contraste	*Sig.*	*Diferencia*	*+/- Límites*
AP.GT-AT.GT		1.11667	1.19842

* indica una diferencia significativa.

ANEXO 7: ANOVA Y TUKEY PARA DESINTEGRACIÓN EN COMPOST

Tabla F.1.: ANOVA para el valor de desintegración en compost por TRATAMIENTO

Fuente	*Suma de Cuadrados*	*Gl*	*Cuadro Medio*	*Razón-F*	*P-Valor*
Entre grupos	238.046	1	238.046	35.41	0.0003
Intra grupos	53.7801	8	6.72251		
Total (Corr.)	291.826	9			

Pruebas de Múltiple Rangos para valor de desintegración en compost por tratamiento

Método: 95.0 porcentaje Tukey HSD

tratamiento	*Casos*	*Media*	*Grupos Homogéneos*
AP.GT	5	59.312	X
AT.GT	5	69.07	X

Contraste	*Sig.*	*Diferencia*	*+/- Límites*
AP.GT-AT.GT	*	-9.758	3.78144

* indica una diferencia significativa.