

Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano
Departamento de Agroindustria Alimentaria
Ingeniería en Agroindustria Alimentaria



Proyecto Especial de Graduación
**Elaboración y caracterización fisicomecánica de una película
biodegradable utilizando harina de cáscara de plátano (*Musa
paradisiaca L.*)**

Estudiante

Amalia María Díaz Alejandro

Asesores

Luis Fernando Osorio, Ph.D.

Luis Fernando Maldonado, Ph.D.

Honduras, agosto 2021

Autoridades

TANYA MÜLLER GARCÍA

Rectora

ANA M. MAIER ACOSTA

Vicepresidenta y Decana Académica

ADELA M. ACOSTA MARCHETTI

Directora Departamento de Agroindustria Alimentaria

HUGO ZAVALA MEMBREÑO

Secretario General

Contenido

Contenido.....	3
Índice de Cuadros.....	4
Índice de Figuras	6
Índice de Anexos	7
Resumen	8
Abstract.....	9
Introducción.....	10
Materiales y Métodos	13
Resultados y Discusión.....	27
Conclusiones	63
Recomendaciones.....	64
Referencias.....	65
Anexos.....	72

Índice de Cuadros

Cuadro 1 Equipos utilizados para el desarrollo de la película biodegradable.	13
Cuadro 2 Formulación utilizada en el desarrollo de la biopelícula.	15
Cuadro 3 Niveles codificados de las variables del experimento.....	26
Cuadro 4 Diseño experimental completo con valores codificados y decodificados.	26
Cuadro 5 Rendimiento de cáscara de plátano a harina.....	27
Cuadro 6 Análisis realizados a la harina de cáscara de plátano.....	28
Cuadro 7 Datos de absorbancia obtenidos para almidón de tapioca.....	30
Cuadro 8 Cuantificación de almidón total presente en harina de cáscara de plátano y almidón de tapioca.	31
Cuadro 9 Efecto de las variables independientes sobre el grosor de las biopelículas.....	33
Cuadro 10 Estadígrafos del modelo de regresión polinomial para el grosor de las biopelículas.	34
Cuadro 11 Efecto de las variables independientes sobre el ΔE de las biopelículas.....	36
Cuadro 12 Estadígrafos del modelo de regresión polinomial para el ΔE de las biopelículas.....	37
Cuadro 13 Efecto de las variables independientes sobre la humedad de las biopelículas.	39
Cuadro 14 Estadígrafos del modelo de regresión polinomial para la humedad de las biopelículas. ...	40
Cuadro 15 Efecto de las variables independientes sobre PVA de las biopelículas.	42
Cuadro 16 Estadígrafos del modelo de regresión polinomial para PVA de las biopelículas.	43
Cuadro 17 Efecto de las variables independientes sobre la solubilidad de las biopelículas.	45
Cuadro 18 Estadígrafos del modelo de regresión polinomial para solubilidad de las biopelículas.	46
Cuadro 19 Efecto de las variables independientes sobre la resistencia a la perforación de las biopelículas.	48
Cuadro 20 Estadígrafos del modelo de regresión polinomial para la resistencia a la perforación de las biopelículas.	49
Cuadro 21 Efecto de las variables independientes sobre la fuerza de tensión de las biopelículas.	51

Cuadro 22 <i>Estadígrafos del modelo de regresión polinomial para fuerza de tensión de las biopelículas.</i>	52
Cuadro 23. <i>Efecto de las variables independientes sobre la deformación de las biopelículas.</i>	53
Cuadro 24 <i>Estadígrafos del modelo de regresión polinomial para la deformación de las biopelículas.</i>	54
Cuadro 25 <i>Efecto de las variables independientes sobre el módulo de Young de las biopelículas.</i>	56
Cuadro 26 <i>Estadígrafos del modelo de regresión polinomial para el módulo de Young de las biopelículas.</i>	57
Cuadro 27 <i>Caracterización el suelo utilizado en el análisis de biodegradación.</i>	58
Cuadro 28 <i>Composición nutricional del suelo utilizado en el análisis de biodegradabilidad.</i>	58
Cuadro 29 <i>No encuentre donde menciona este cuadro Porcentaje y muestra gráfica del área biodegradada de la biopelícula.</i>	60
Cuadro 30 <i>Resultados de las variables dependientes del tratamiento óptimo.</i>	62

Índice de Figuras

Figura 1 <i>Flujo de proceso de la elaboración de harina de cáscara de plátano.</i>	14
Figura 2 <i>Flujo de proceso de la elaboración de biopelículas.</i>	16
Figura 3 <i>Curva estándar de almidón de tapioca.</i>	30
Figura 4 <i>Efecto de las variables independientes sobre el grosor de las biopelículas.</i>	34
Figura 5 <i>Efecto de las variables independientes sobre el ΔE de las biopelículas.</i>	37
Figura 6 <i>Efecto de las variables independientes sobre la humedad de las biopelículas.</i>	40
Figura 7 <i>Efecto de las variables independientes sobre PVA de las biopelículas.</i>	43
Figura 8 <i>Efecto de las variables independientes sobre la solubilidad de las biopelículas.</i>	46
Figura 9 <i>Efecto de variables independientes en la resistencia a la perforación de las biopelículas.</i> ...	49
Figura 10 <i>Efecto de las variables independientes sobre la fuerza de tensión de las biopelículas.</i>	52
Figura 11 <i>Efecto de las variables independientes sobre deformación de las biopelículas.</i>	55
Figura 12 <i>Efecto de las variables independientes sobre el módulo de Young de las biopelículas.</i>	57
Figura 13 <i>Valores óptimos de la función de deseabilidad de la película biodegradable.</i>	61

Índice de Anexos

Anexo A <i>Pruebas preliminares realizadas</i>	72
Anexo B <i>Prueba cualitativa de almidón para harina de cáscara de plátano</i>	73
Anexo C <i>Pruebas microbiológicas indicadoras de presencia de bacterias y hongos en suelo</i>	74

Resumen

En la época moderna, la producción de plástico ha proporcionado muchas ventajas en la conservación, transporte y almacenamiento de alimentos. Actualmente, el plástico es la tercera aplicación más usada del petróleo en el mundo. Este ha sido el mayor problema identificado por los científicos, ya que se espera que el precio de los plásticos sintéticos tenga un aumento drástico, como resultado, el agotamiento de este recurso no renovable. El objetivo de este estudio fue elaborar una película biodegradable a partir de harina de cáscaras de plátano verde y determinar la mejor combinación de glicerol y gomas que optimice las propiedades mecánicas y de barrera. Se utilizó la metodología de Superficie de Respuesta con un modelo rotacional y se definieron las siguientes variables independientes: porcentaje de glicerol y proporción de pectina con respecto al alginato de sodio. Las variables dependientes fueron: Grosor, propiedades de barrera, propiedades ópticas y mecánicas. Se generaron nueve regresiones matemáticas, definiendo seis de carácter predictivo y tres de carácter tendencioso. La combinación que optimizó las propiedades de las biopelículas desarrolladas fueron 5.38% de glicerol y una relación de 77% de pectina y 23% de alginato de sodio. El tratamiento cuatro, con 10.5% de glicerol y el tratamiento seis, con 11.74% de glicerol, presentaron un porcentaje de biodegradación en el suelo mayor al 90%. Esto está relacionado con el aumento en el contenido de humedad de las biopelículas, lo cual tiene un impacto directo en la aceleración de este proceso.

Palabras clave: Alginato de sodio, biopelículas, glicerol, pectina.

Abstract

In modern times, plastic production has provided many advantages in the preservation, transport, and storage of food. Currently, plastic is the third most widely used application of petroleum in the world. This has been the biggest problem identified by scientists, as the price of synthetic plastics is expected to rise dramatically, resulting in the depletion of this non-renewable resource. The objective of this study was to develop a biodegradable film from green plantain peel flour and determine the best combination of glycerol and gums that optimizes the mechanical and barrier properties. The Response Surface Methodology with a rotational model was used and the following independent variables were defined: glycerol percentage and pectin ratio to sodium alginate. The dependent variables were thickness, barrier properties, optical and mechanical properties. Nine mathematical regressions were generated, defining six of a predictive nature and three of a tendentious nature. The combination that optimized the properties of the biofilms developed were 5.38% glycerol and a ratio of 77% pectin and 23% sodium alginate. Treatment four, with 10.5% glycerol and treatment six, with 11.74% glycerol, had a percentage of biodegradation in the soil greater than 90%. This is related to the increase in the moisture content of biofilms, which has a direct impact on the acceleration of this process.

Keywords: Biofilms, glycerol, pectin, sodium alginate.

Introducción

En la actualidad, la producción de plástico ha proporcionado muchas ventajas en la conservación, transporte y almacenamiento de alimentos. Sin embargo, la producción excesiva de plástico ha llegado a un punto que afecta el medio ambiente. Se estima que el 91% de todos los plásticos producidos a nivel mundial no se reciclan, y a medida que pasan los años, esta producción va en aumento (Alves et al. 2019). El proceso de remoción y disposición final es muy costoso y genera un efecto negativo sobre la conservación y protección de ecosistemas, especialmente acuáticos, el cual alberga 8.75 millones de toneladas de plástico (Grün 2016).

El polietileno es el material sintético de uso común para empaques de alimentos. No obstante, diversos estudios han demostrado que estos producen toxinas contaminantes en el sistema digestivo de especies de aves y vertebrados marinos, representando, de igual manera, un peligro para el consumo humano (Eljarrat 2019). Así mismo, los plásticos convencionales, no solo necesitan décadas para degradarse, sino que también, requieren grandes espacios de almacenaje, ocasionan la muerte de animales que son esenciales en el hábitat en el cual se desarrollan y producen contaminación visual (González Y et al. 2013).

No obstante, el mayor problema identificado por los científicos es el agotamiento de un recurso no renovable, el cual es el petróleo. Actualmente, el plástico es la tercera aplicación del petróleo más usada en el mundo y se espera que el precio de los plásticos sintéticos tenga un aumento drástico, al aumentar el precio del petróleo, como resultado de la escasez de esta fuente natural (González Y et al. 2013). Los plásticos convencionales dependen directamente del petróleo, sin embargo, se ha establecido que una industria y en particular una economía, peligra y se debilita si es dependiente del petróleo, solamente.

Por otro lado, otra fuente principal que genera residuos es la industria agrícola, de la cual derivan raíces, tallos, hojas u otras partes que no son utilizados como materia prima y se convierten en desechos por no darles una adecuada utilización (Haro et al. 2017). Según INEC (2016), un residuo

se define como aquel material que no tiene ningun valor económico pero sí un valor comercial para su recuperación e incorporación al ciclo de vida de la materia. En este contexto, los residuos de plátano pueden ser utilizados para diversos fines científicos y nutricionales, a partir de alternativas adecuadas de reciclaje y tratamiento de desechos, disminuyendo el impacto ambiental. Además de deshacerse del exceso de desecho, las compañías productoras de esta materia prima invertirían en una solución que aumentaría su capital, contribuyendo a mejorar su situación financiera.

El principal subproducto del procesamiento del plátano, es la cáscara, la cual representa el 30% del peso total del fruto (Blasco y Gómez 2014). La cáscara de plátano verde contiene altas fuentes de almidón, aproximadamente 70%. A medida que las cáscaras de plátano maduran, el nivel de glucosa aumenta (Kader y Wan 2017). La utilización de los residuos de plátano se convierte en una opción viable, mediante la cual se pretende aprovechar el alto contenido de almidón que podría mejorar los atributos de los bioplásticos. Este desarrollo e innovación permitirá una descomposición acelerada de los materiales de empaque y aportarán materia orgánica al suelo, protegiendo la biodiversidad de los ecosistemas (Haro et al. 2017).

Los polímeros renovables que son útiles para fabricar biomateriales tienen como componente principal el almidón y mezclas de polímeros degradables. Estos pueden ser reforzados con otros productos, como lo son, aditivos, antioxidantes, gelificantes, plastificantes, entre otros. Con estos productos, se pueden mejorar las propiedades barreras frente a la humedad, ofrecer una mejor transparencia e incluso, presentar propiedades fungicidas y bactericidas, relacionadas a las propiedades del subproducto agrícola utilizado.

Muchos investigadores señalan un importante crecimiento en el interés por el desarrollo y caracterización de empaques biodegradables, los cuales mantienen atributos que los caracterizan como un material eficaz para asegurar la calidad e inocuidad de los alimentos. La creciente demanda de biomateriales se debe, principalmente, a la necesidad de reducir el consumo de plásticos sintéticos y sustituirlos por materiales que no degraden el medio ambiente (Aguilar 2005). Según Río et al.

(2007), para el año 2005, Europa fue el principal consumidor de bioplásticos. Esto fue causa del establecimiento de políticas a favor del reciclaje, el compostaje y la valorización de residuos.

El desarrollo de nuevos empaques biodegradables contribuye y consolida la introducción del reciclaje a las sociedades latinoamericanas, implementando soluciones técnicas y medioambientales factibles. A partir de estos estudios, se obtienen alternativas sostenibles, que buscan reducir el impacto ambiental que amenaza a muchos organismos y contribuyen, al máximo, con el reciclaje; disminuyendo la generación de gases tóxicos y acumulación, tanto de plásticos como de residuos agrícolas.

En este sentido, se definieron los siguientes objetivos específicos para este estudio; elaborar y caracterizar una película biodegradable a partir de harina de cáscara de plátano, determinar la mejor combinación de glicerol y relación de gomas (pectina/alginato de sodio) que optimice las propiedades físicas, mecánicas y de barrera de la biopelícula y evaluar el porcentaje de biodegradabilidad de la biopelícula elaborada a partir de almidón de cáscara de plátano.

Materiales y Métodos

Localización

El estudio se realizó en el laboratorio de Análisis de Alimentos de la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, localizada en el Valle del Yeguaré, 32 km al Este de la ciudad de Tegucigalpa, Departamento de Francisco Morazán, Honduras, C.A.

Materias Primas

Para la elaboración de la película biodegradable y de la harina de cáscara de plátano, se utilizó como materia prima cáscaras de plátano (*Musa paradisiaca*), variedad Curaré Enano. Se utilizaron otros ingredientes como glicerol (1,2,3-trihidroxipropano), alginato de sodio de la marca Tic Gums y pectina de la marca Hercules Incorporated. Los equipos utilizados para la elaboración del bioplástico se describen en el Cuadro 1.

Cuadro 1

Equipos utilizados para el desarrollo de la película biodegradable.

Equipo	Marca/Modelo
Texturómetro	BROOKFIELD CT3
Estufa agitador	THERMO Scientific
Cámara de estabilidad	NORLAKE Scientific
Balanza analítica	OHAUS ADVENTURER
Colorímetro	Colorflex Hunterlab
Horno al vacío	NAPCO 5831
Molino	FOSS CT 193 CYCLOTEC
Horno de convección	FISHER Scientific

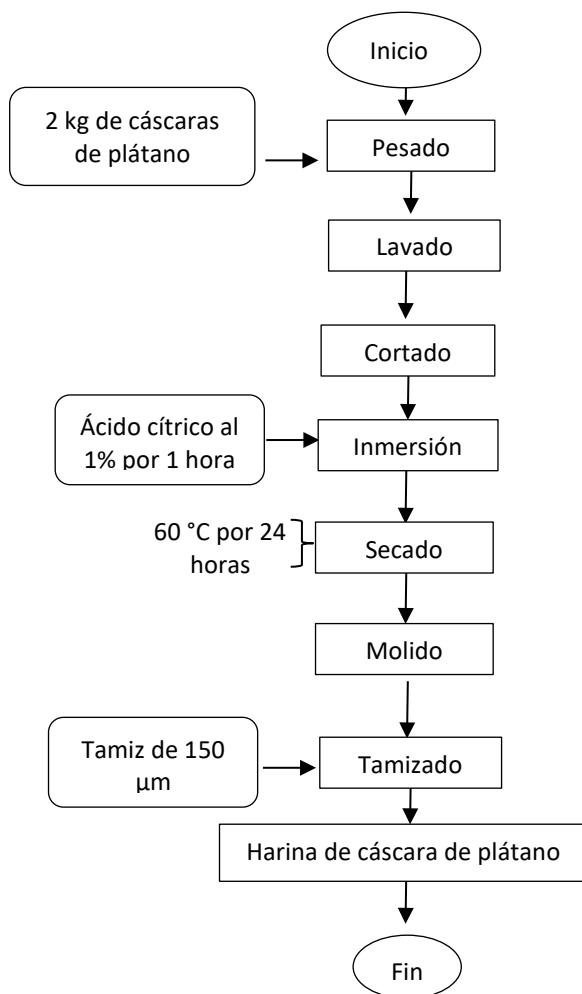
Obtención de Harina de Cáscara de Plátano

Las cáscaras de plátano fueron adquiridas de la microempresa "Tajiricas". Aproximadamente, 2 kg de cáscaras fueron seleccionadas, lavadas con agua potable y cortadas. Posteriormente, las cáscaras de plátano se dejaron en reposo en 2 L de solución de ácido cítrico al 1% durante 1 hora. Concluido este lapso, las cáscaras fueron removidas de la solución ácida y colocadas en bandejas de aluminio. Finalmente, fueron secadas en el horno a 60 °C por 24 horas, según la metodología Kader y Wan (2017) y González Y et al. (2013), con adaptaciones. Una vez secado, el producto obtenido, se

trituró en un molino de martillo y se tamizó en el equipo Ro-Tap (W.S TYLER®) durante cinco minutos, con el objetivo de reducir el tamaño de partícula a 150 μm . La harina de cascara de plátano se almacenó en una bolsa plástica a temperatura ambiente (Figura 1).

Figura 1

Flujo de proceso de la elaboración de harina de cáscara de plátano.



Elaboración de la Película Biodegradable

Para elaborar la película biodegradable, se realizaron diversas pruebas preliminares (Anexo A) e investigaciones de diversas metodologías para encontrar las cantidades óptimas de harina de cascara de plátano, glicerol, alginato de sodio y pectina a utilizar. Se diluyó, en 89 mL de agua destilada, la cantidad correspondiente de glicerol para las variables establecidas. La solución resultante fue homogenizada con 5 g de harina de cascara de plátano. Posteriormente, la mezcla

obtenida se agitó a 300 rpm y se calentó a 65 - 70 °C para facilitar su dilución (Lim WSu et al. 2020). Con el propósito de obtener una película homogénea en apariencia y textura, la mezcla fue filtrada al vacío, utilizando un matraz Kitasato y un filtro de porcelana. De la mezcla filtrada anteriormente, se colocaron 50 mL en vasos de precipitado de 100 mL y se adicionó la cantidad correspondiente de pectina y alginato de sodio para cada variable descrita en este estudio. Las combinaciones de estas gomas fueron determinadas para sumar un total de 1 g en la formulación (Cuadro 2). Se mantuvieron las condiciones de agitación, no obstante, la nueva mezcla se calentó a 50 °C por 30 minutos (Arteaga y Zavala 2018). Para eliminar la presencia de burbujas, la dispersión fue desgasificada en un horno al vacío a 60 °C y 12 psi por 15 minutos (Figura 2).

Cuadro 2

Formulación utilizada en el desarrollo de la biopelícula.

Ingrediente	Cantidad	%
Harina de cáscara de plátano	5 g	4.5
Agua destilada	89 ml	89
Glicerol	5 g	4.5
Pectina	0.6 g	1.17
Alginato de sodio	0.4 g	0.78

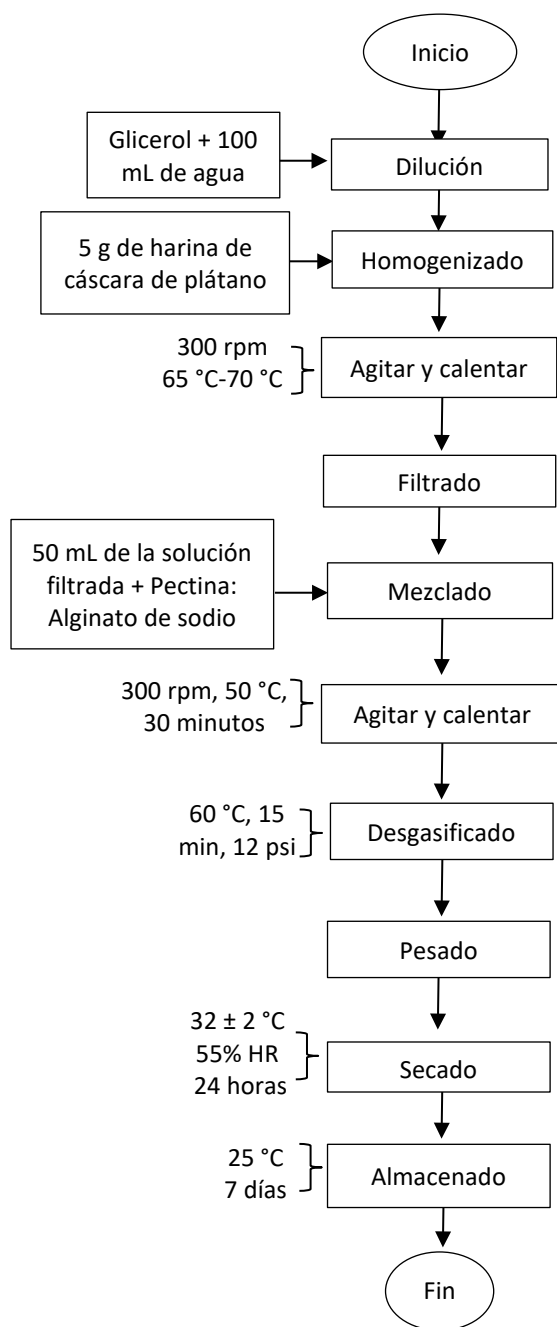
Nota. Formulación correspondiente al tratamiento 1.

Secado y Acondicionamiento de las Biopelículas

Se vertieron 30 ± 0.5 g de solución en platos de plásticos de 162 cm^2 de área. Para el secado de las biopelículas, se utilizó una cámara de estabilidad a una temperatura de 32 ± 2 °C y 55% de humedad relativa durante 24 horas. Concluido el tiempo de secado, las películas fueron separadas de los platos de plástico manualmente y se almacenaron por 7 días en un desecador a 25 °C con una solución saturada de hidróxido de sodio al 60% (Cesar 2018).

Figura 2

Flujo de proceso de la elaboración de biopelículas.



Caracterización de la Harina de Cáscara de Plátano

Humedad

Se determinó mediante el método AOAC 934.01, el cual se calcula por diferencia de peso y se expresa en porcentaje de humedad (g de H₂O/100 g de muestra). Este análisis se realizó por

duplicado, por medio de un horno de convección a 105 °C durante 24 horas. El porcentaje de humedad se obtuvo por medio de la Ecuación 1.

$$\text{Humedad (\%)} = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \quad [1]$$

Donde:

m1: peso del crisol.

m2: peso del crisol más la muestra húmeda.

m3: peso del crisol más la muestra seca.

Índice de Solubilidad en Agua (ISA) e Índice de Absorción de Agua (IAA)

Los análisis se realizaron por duplicado con la técnica modificada de Salmerón (2019). Se pesó 1 ± 0.001 g de muestra en base húmeda, a la cual se le agregaron 30 mL de agua en tubos de centrifugación tarados. Estos se agitaron en el Vortex® múltiple a 1200 rpm durante un minuto, con el objetivo de homogenizar la muestra. Subsiguientemente, las muestras se almacenaron por 24 horas a 25 °C. Finalizado este período de tiempo, los tubos con las muestras se centrifugaron a 3000 rpm durante 15 minutos. El gel sedimentado se separó por decantación y lo floculado se drenó en un plato Petri, previamente secado en un horno de convección por 12 horas a 105 °C. Se registró el peso del tubo con el gel y lo floculado se evaporó durante cuatro horas a 105 °C. Finalmente, los platos Petri se enfriaron por media hora en un desecador con silica gel para, posteriormente, pesar los sólidos disueltos. Los índices se calcularon mediante las Ecuaciones 2 y 3.

$$\text{ISA(\%)} = \frac{\text{Peso de los sólidos disueltos}}{\text{Peso seco de la muestra}} \times 100 \quad [2]$$

$$\text{IAA} = \frac{\text{Peso del gel}}{\text{Peso seco de la muestra}} \quad [3]$$

Fibra Cruda

El contenido de fibra fue determinado por el método AOAC 962.09, aplicado a cereales, harinas, piensos, materiales fibrosos, materiales de los que se extraen grasas y alimentos para mascotas (AOAC 2000). Este análisis se realizó por duplicado, a través del equipo ANKOM²²⁰. Se pesó 1 ± 0.001 g de muestra en bolsas filtro, anteriormente secadas en el horno a 105 °C por 1 hora. Las bolsas de filtro con las muestras más un blanco fueron selladas con calor y fueron introducidas en el equipo. Se adicionaron 2 L de una solución de H₂SO₄ al 0.255 N, se agitó y calentó durante 30 minutos. Consecutivamente, esta solución fue decantada y fueron realizados tres lavados con agua destilada a 100 °C durante cinco minutos. Se repitió este procedimiento, no obstante, en lugar de agregar una solución ácida, se adicionaron 2 L de NaOH al 0.313 N. Las bolsas filtro se dejaron en reposo en metanol durante 3 minutos. Finalmente, las muestras fueron colocadas en crisoles previamente secados y pesados, y se introdujeron en el horno a 105 °C durante 2 horas y 30 minutos, posteriormente se calcinó la muestra más la bolsa en la mufla a 550 °C por 2 horas. La fibra cruda fue determinada mediante la Ecuación 4.

$$\% \text{ Fibra cruda} = \frac{(C - (A * 0.992))}{B} \times 100 \quad [4]$$

Donde:

C: Pérdida de peso en la ignición de la bolsa con la muestra.

A: Peso de la bolsa.

B: Peso de la muestra.

0.992: Corrección del blanco de la bolsa con cenizas.

Color

Se utilizó el Colorflex Hunterlab® para evaluar este parámetro por triplicado. Se midió el valor de L, en una escala en donde 0 es negro y 100 es blanco; el valor de a, en una escala en donde -60 es verde y 60 es rojo; y el valor de b, en una escala en donde -60 es azul y 60 es amarillo.

Cuantificación de Almidón

En primer lugar, se estableció una curva estándar utilizando almidón de tapioca de la marca National Starch. Se realizaron concentraciones conocidas expresadas en $\mu\text{g/mL}$ (20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180, 200 $\mu\text{g/mL}$) para su lectura en el espectrofotómetro UV-visible (Agilent Technologies Cary 8454), a una longitud de onda de 600 nm ($R^2= 0.999$).

Para cuantificar la cantidad de almidón contenido en la harina de cáscara de plátano, se pesaron 200 mg de la harina con una balanza analítica marca Ohaus Adventurer y se diluyeron en 100 mL de agua desionizada, la muestra se gelatinizó a 72 °C. Posteriormente, se tomó un punto en el centro de la curva estándar realizada anteriormente y a ese punto de concentración se realizó la dilución correspondiente para las muestras. Adicionalmente, se realizó este procedimiento para un blanco positivo de almidón de tapioca, con el objetivo de comprobar la exactitud en el método de cuantificación. Se colocaron 4 mL de la solución de almidón diluida en tubos de ensayo y se adicionaron 6 mL de Lugol, solución indicadora de presencia de almidón. Las muestras fueron colocadas en celdillas de cuarzo para leer en espectrofotometría. Estas se introdujeron en el espectrofotómetro UV-visible (Agilent Technologies Cary 8454) y se leyó la absorbancia a una longitud de onda de 600 nm. La cantidad de almidón presente en la muestra se calculó utilizando la lectura de absorbancia de cada una de las muestras y el modelo obtenido de la curva de almidón estándar, anteriormente descrita (Guadrón 2019). Se realizó una prueba cualitativa de presencia de almidón, como parte preliminar de este análisis (Anexo B)

Análisis de la Película Biodegradable

Grosor

El grosor de las biopelículas fue evaluado utilizando un micrómetro manual Mitotuyo con una precisión de 0.001 mm. Se tomaron medidas en diez puntos aleatorios de las muestras (Muñoz 2014).

Color

Se evaluó la diferencia del color en las muestras utilizando Colorflex Hunter Lab Modelo 45/0 donde se identificaron los valores L, a y b. Este análisis fue realizado por triplicado y se utilizó la Ecuación 5, para determinar la diferencia de color entre un tratamiento control y los 14 tratamientos definidos

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^2) + (\Delta a^2) + (\Delta b^2)} \quad [5]$$

Donde:

$$\Delta L = L - L_0, \Delta a = a - a_0, \Delta b = b - b_0.$$

L, a y b representan los valores del color de las muestras y L_0 , a_0 y b_0 representan los valores de un tratamiento control sin harina de cáscara de plátano ($L_0 = 62.34$; $a_0 = 1.61$ $b_0 = 28.48$).

Propiedades Mecánicas

Fuerza de Perforación

Consiste en determinar la fuerza y distancia que requiere un material para romperse. Las biopelículas se cortaron en 50 mm de longitud y 25 mm de ancho, estas fueron colocadas en el soporte del texturómetro. Al texturómetro se le acopló una sonda cilíndrica de 2 mm de diámetro y una velocidad de 0.9 mm/s. Se utilizó la Ecuación 6 para estimar este parámetro (Cesar 2018).

$$\text{Resistencia a la perforación (h)} = \frac{F_p}{L} \quad [6]$$

Donde:

F_p = pico de fuerza antes de la ruptura.

L = espesor de la película.

Elongación

A partir de esta prueba se pueden determinar tres propiedades: Tensión de ruptura, deformación y módulo de Young. Se cortaron piezas de 40 mm de largo y 15 mm de ancho de la

biopelícula. Utilizando el texturómetro Brookfield CT3, se determinó el esfuerzo perpendicular necesario para lograr el estiramiento y fractura de la biopelícula, para ello se sujetó la misma a la base del equipo. Se utilizó una mordaza TA-DE y una distancia entre mordazas de 30 mm, con una velocidad de 0.9 mm/s. Se establecieron parámetros iniciales de la prueba de acuerdo con pruebas preliminares.

Inicialmente, un material ofrece una resistencia creciente a la fuerza de tensión, lo que provoca su alargamiento. En este análisis se evaluaron dos tipos de tensiones; la tensión de ruptura y la tensión de tracción. El primer tipo de tensión se define como la fuerza necesaria para romper la muestra. Esta se calculó mediante la relación entre la fuerza (N) y el área de la sección transversal de la biopelícula (m²) (Vicentini 2003). La tensión de tracción es definida como una magnitud asociada a la fuerza de estiramiento, la cual es responsable del alargamiento del material a lo largo del eje de la carga aplicada, antes de llegar al pico de ruptura. Esta prueba expresa la capacidad de un material para resistir cambios de forma sin romperse o formar grietas y fue determinado por la relación entre la fuerza de la carga aplicada y el área de la sección transversal. La deformación en la ruptura se obtuvo por medio de la Ecuación 7 (Guimarães et al. 2012).

$$\text{Deformación lineal (\%)} = \frac{L - L_0}{L_0} \times 100 \quad [7]$$

Donde:

L = Longitud final.

L₀ = Longitud inicial.

Finalmente, el módulo de Young es un indicador de la rigidez y elasticidad de un material. Cuanto mayor sea el valor del módulo de Young más rígido será el objeto. Este parámetro se mide por la relación de tensión (Tensile stress) y la deformación (Aravas y Laspidou 2008). Se utilizó la Ecuación 8 para determinar esta variable.

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad [8]$$

Donde:

σ : Fuerza de tensión (N/m²).

ϵ : Deformación.

Solubilidad en Agua

Se siguió la metodología de Arteaga y Zavala (2018), modificada. Aproximadamente, se contaron círculos de 20 mm y se adicionaron 30 mL de agua destilada. Se mantuvieron a 25 °C por 24 horas con ligera agitación cada 3 horas. Para obtener el valor de solubilidad, se recuperó la parte insoluble y se secó a 105 °C por 24 horas. El porcentaje de solubilidad se determinó mediante la Ecuación 9.

$$\text{Solubilidad (\%)} = \frac{(P_i - P_f)}{P_i} \times 100 \quad [9]$$

Donde:

P_i = Peso inicial.

P_f = Peso final.

Humedad

Este procedimiento se describe según la norma ASTM D6980-09 Standard Test Methods for Determine Moisture in Plastic, con el objetivo de determinar el porcentaje de humedad presente en las biopelículas. Se cortaron círculos de 20 mm de diámetro y se colocaron en crisoles previamente secados a 105 °C por 24 horas. Al finalizar este período, se dejaron enfriar las muestras en un desecador por 30 minutos y finalmente se pesaron. Se calculó el porcentaje de humedad en relación con la pérdida de peso, por medio de la Ecuación 10:

$$\text{Humedad (\%)} = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \times 100 \quad [10]$$

Donde:

m_1 = peso del crisol.

m_2 = peso del crisol más la muestra húmeda.

m3 = peso del crisol más la muestra seca.

Permeabilidad al Vapor de Agua

Se determinó la Permeabilidad al Vapor de Agua (PVA) en las películas siguiendo el método propuesto por ASTM (American Society for Testing and Material 12 E96-80) modificado por Guimarães et al. (2012). Las muestras fueron cortadas en círculos de 30 mm de diámetro y fueron colocadas en vasos volumétricos con 30 ± 2 g de agua destilada. Los vasos volumétricos se colocaron en un desecador con silica gel, con el objetivo de asegurar una humedad relativa cercana a 0% y se mantuvieron a una temperatura de 25 °C. En el transcurso de 9 días, se pesaron los vasos volumétricos, en un lapso de 24 horas. Se utilizó la Ecuación 11, para determinar este parámetro.

$$PVA = \left(\frac{\Delta m}{\Delta t} \right) \times \frac{x}{\Delta P \cdot a} \quad [11]$$

Donde:

$\Delta m/\Delta t$ = pérdida de peso de la biopelícula en función del tiempo, g/h.

a = área de permeabilidad, m^2 .

x = espesor de la película, mm.

ΔP = diferencia de presiones entre el gel de silicato (0 Pa a 25 °C) y el vapor de agua pura saturada (3.179 kPa a 25 °C).

Biodegradación en Suelo

Este procedimiento se realizó siguiendo la metodología de García Vásquez (2017) modificada. Para esta parte del estudio, se realizó el análisis a los primeros nueve tratamientos, exceptuando las cinco repeticiones del punto central. Las películas biodegradables se cortaron en forma rectangular de 7 cm² y el peso inicial fue registrado. Las muestras fueron enterradas, durante 12 días, a 10 cm de profundidad en un recipiente, simulando las características de una calicata. El recipiente fue colocado contiguo al Laboratorio de Análisis de Alimentos de Zamorano (LAAZ). Las características fisicoquímicas del suelo fueron determinadas en el Laboratorio de Suelos de Zamorano, en donde se

analizó el medio antes de la biodegradación de la biopelícula (control) y el medio en donde se degradó la biopelícula (Tratamiento) durante los días en los cuales se realizó el análisis. Así mismo, se realizaron análisis para confirmar la presencia de microorganismo en el suelo (Anexo C)

Las condiciones climáticas no fueron monitoreadas, no obstante, durante el transcurso de los 12 días no hubo presencia de precipitación. Finalmente, se pesaron las muestras en una balanza analítica y mediante la siguiente fórmula, se obtuvo el porcentaje de biodegradabilidad, por medio de una relación gravimétrica (Iguardia 2013). Se utilizó la Ecuación 12 para determinar el % de biodegradabilidad.

$$\% \text{ de biodegradabilidad} = 100 - \left[\left(\frac{\text{Peso final}}{\text{Peso inicial}} \right) \times 100 \right] \quad [12]$$

Diseño Experimental y Análisis Estadístico

Se utilizó la metodología de análisis de Superficie de Respuesta con un modelo rotacional para dos factores: Porcentaje de glicerol y proporción de pectina con respecto a alginato de sodio (gomas), con una probabilidad de 10%. Para ajustar el modelo, las variables independientes o factores establecidos fueron estudiadas a través de tres niveles (-1, 0, +1) y fueron calculados por medio de la Ecuación 13:

$$X_i = \frac{x_i \times Z}{\Delta x_i} \quad [13]$$

Donde:

X_i = Valor real de la variable.

x_i = Valor codificado de la variable.

Z = Valor real de la variable en el punto central.

Δx_i = Intervalo de la variable x_i .

El modelo de superficie respuesta presenta dos variables axiales denominadas como $+\alpha$ y $-\alpha$. Este valor depende del número factorial ($F=2^k$) y del número de variables independientes, las cuales son expresadas en la Ecuación 14 y el número de tratamientos se estimó con la Ecuación 15.

$$\pm\alpha = (f^{1/4}) = (2^k)^{1/4} = (2^2)^{1/4} = 1.4142 \quad [14]$$

$$n = 2^k + 2k + m \quad [15]$$

Se estableció un total de 14 unidades experimentales, con cuatro puntos factoriales (2^k), cuatro puntos axiales ($2k$) y seis puntos centrales (m). La amplitud de los rangos de las variables se determinó según los resultados de las pruebas preliminares y literatura consultada para obtener resultados experimentales. El modelo utilizado describió el comportamiento de la combinación entre la variable dependiente (Y_i) o respuesta y la variable independiente (X_k). La respuesta fue evaluada según los niveles en que los factores fueron combinados.

Para predecir el comportamiento de cada variable establecida se utilizó un análisis de regresión ajustada con polinomio cuadrático con las variables (X_k) para cada respuesta (Y). Se hizo uso de la Ecuación 16 de primer orden:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_{11} X_{12} + \beta_{22} X_{22} + \beta_{12} X_1 X_2 + \varepsilon \quad [16]$$

Donde:

Y_i = Función respuesta.

X_1, X_2 = Valores de las variables independientes.

β_0 = Coeficiente relativo a la interpretación del plan con la respuesta en el eje.

β_1, β_2 = Coeficientes lineales estimados por el mínimo cuadrado.

β_{11}, β_{22} = Coeficientes de variables cuadráticas.

β_{12}, β_{13} = Coeficiente de interacción entre las variables independientes.

ε = Error experimental.

En el Cuadro 3, se presentan los niveles codificados (-1, 0, +1) y los niveles axiales ($+\alpha$ y $-\alpha$). Posteriormente, se describen los niveles codificados y valores reales de los tratamientos a evaluar (Cuadro 4).

Cuadro 3

Niveles codificados de las variables del experimento.

Variables Independientes	Niveles				
	$-\alpha$	-1	0	1	$+\alpha$
% Glicerol	3.26	4.5	7.5	10.5	11.74
% Pectina:Alginato de sodio	55.86:44.14	60:40	70:30	80:20	84.14:15.86

Cuadro 4

Diseño experimental completo con valores codificados y decodificados.

Tratamientos	Niveles reales de las variables			
	%Glicerol	%Pectina: Alginato de sodio	%Glicerol	%Pectina:Alginato de sodio
1	-1	-1	4.5	60:40
2	-1	1	4.5	80:20
3	1	-1	10.5	60:40
4	1	1	10.5	80:20
5	-1.41	0	3.26	70:30
6	1.41	0	11.74	70:30
7	0	-1.41	7.5	55.86:44.14
8	0	1.41	7.5	84.14:15.86
9 ©	0	0	7.5	70:30
10 ©	0	0	7.5	70:30
11 ©	0	0	7.5	70:30
12 ©	0	0	7.5	70:30
13 ©	0	0	7.5	70:30
14 ©	0	0	7.5	70:30

Nota. © Puntos centrales

Para el análisis y obtención de variables codificadas, coeficientes de regresión de variables decodificadas y valores en las curvas del diseño superficie-respuesta del experimento, se utilizó el programa Statistica 7. Para validar la obtención de respuestas ajustadas al modelo lineal y garantizar la obtención de diferencias significativas, se utilizó un R^2 mayor a 0.70. Los modelos que presentaron un R^2 menor a 0.70 se consideraron tendenciosos. Se realizó un ANDEVA, empleando un nivel de significancia del 90% (Paspuel 2016).

Resultados y Discusión

Caracterización de la Harina de Cáscara de Plátano

Se conoce como harina a aquel producto fino triturado y tamizado obtenido a través de la molienda seca de cereales, leguminosas y otros productos. La harina de cáscara de plátano es un producto con elevado potencial de almacenamiento y vida útil prolongada, debido a su baja actividad de agua. La composición proximal de la harina dependerá del origen, variedad, el momento de cosecha y el procedimiento de secado de la materia prima (Amini et al. 2019). En el Cuadro 5, se muestra el rendimiento obtenido en la preparación de la harina de cáscara de plátano verde.

Cuadro 5

Rendimiento de cáscara de plátano a harina.

Muestra	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Rendimiento (%)
Harina de cáscara de plátano	2039	273	13.38

Mazzeo et al. (2008), evaluaron el rendimiento de extracción de almidón de plátano a partir de dos métodos; el método seco, destinado a la producción de harinas y el método húmedo. Efectivamente, obtuvieron datos similares a los de este estudio, con un rendimiento promedio por el método seco de 10.93% en comparación con el método húmedo que registró un rendimiento de 12.53%, demostrando que el proceso de extracción por vía húmeda presenta mayores rendimientos. No obstante, el método seco, utilizado en este experimento, presenta otras ventajas como lo son, menores costos de inversión y equipos, lo cual permite asegurar un alto grado de replicabilidad de los ensayos, así como también, presenta menos problemas de contaminación del medio ambiente debido a que la demanda de agua no es tan elevada.

El bajo rendimiento obtenido en la producción de harina de cáscara de plátano está relacionado con el alto contenido de humedad, debido al buen desarrollo del sistema vascular de la cáscara. Según Soto (2010) y Yangilar (2015), la harina producida a partir de este desecho agrícola puede alcanzar niveles de humedad de 9.45 y 11.08%, respectivamente; lo cual deja en evidencia que

el porcentaje de humedad de 10.37%, reportado en este estudio, se adecúa a los rangos investigados. En el Cuadro 6, se puede observar un resumen de los análisis adicionales realizados a la harina de cáscara de plátano variedad Curaré Enano.

Cuadro 6

Análisis realizados a la harina de cáscara de plátano.

Análisis	Harina de cáscara de plátano Media \pm D.E.	C.V. (%)
Humedad (%)	10.37 \pm 0.16	1.59
Fibra (%)	7.96 \pm 0.05	0.71
IAA	4.84 \pm 0.06	1.25
ISA (%)	16.39 \pm 0.23	1.42
L (0-100)	47.17 \pm 0.26	0.57
a (0-60)	4.47 \pm 0.07	1.58
b (0-60)	15.17 \pm 0.09	0.65

Nota. C.V.: Coeficiente de Variación. D.E.: Desviación Estándar. IAA: Índice de Absorción de Agua. ISA: Índice de Solubilidad de Agua. Escala

L (0 negro, 100 blanco). Escala a (-60 verde, +60 rojo). Escala b (-60 azul, +60 amarillo).

El IAA e ISA son excelentes parámetros para evaluar la integridad del granulo de almidón, así como también, influye en las características funcionales de alimentos. El contenido de amilopectina en una muestra que contiene almidón determina la capacidad de absorción de agua y el contenido de amilosa esta positivamente relacionado con la solubilidad en agua.

Las muestras de harina de cascara de plátano presentaron valores de solubilidad y absorción de agua relativamente altos, en comparación con los porcentajes obtenidos por Guadrón (2019), Giraldo-Gómez et al. (2019) y Hadisoewignyo et al. (2017), quienes reportaron porcentajes menores al 5% de ISA y 2.89 de IAA. Esto está relacionado con el tamaño de partícula utilizado en este estudio. A medida que el tamaño de partícula es mayor, el contenido de cenizas, proteínas y otros compuestos incrementará. Estos componentes tienen la capacidad de absorber mayor cantidad de agua y de solubilizarse en agua de forma más fácil.

La fibra está constituida por los componentes de la pared celular de los vegetales, que no pueden ser digeridos por las enzimas que produce el ser humano y la mayoría de los animales. El porcentaje obtenido en este estudio es similar al obtenido por Ayala et al. (2003). Dicho estudio

presentó 6.66% de fibra cruda en harina de cáscara de plátano verde, siendo este dato menor al que presenta la harina de cáscara madura. Ly et al. (2013), observaron que la harina hecha a partir de fruta sin cáscara es más digerible que la que contiene cáscara, ya sea verde como madura. No obstante, la cascara de plátano verde contiene menor cantidad de fibra cruda y mayor cantidad de taninos, compuestos que mejora el consumo voluntario y la digestión. Al madurar, el contenido de taninos disminuye y el de fibra aumenta.

El color de la harina obtenido a partir de cáscara de plátano es un parámetro indicativo de las características del genotipo, método de procesamiento y la tasa de madurez. Esto se ve reflejado en los valores de L, a y b obtenidos en este estudio, los cuales son similares con los datos descritos por Alkarkhi et al. (2011) para L y a, correspondientes a 48.73 y 5.20, respectivamente. No obstante, el valor b obtenido en este estudio fue más bajo en comparación con otras investigaciones que reportan 23.27, esto está relacionado con la tasa de madurez de la cáscara. Mientras más maduro el fruto de plátano, se tendrá valores más elevados de b. Así mismo, los azúcares simples presentes en la etapa verde de madurez del fruto de plátano pueden reaccionar con los aminoácidos y generar una reacción de Maillard durante el proceso de secado, produciendo pigmentos oscuros, reflejados en el valor L.

Cuantificación de Almidón

Estudios preliminares por Nimsung et al. (2007), Nuñez (2003) y Alkarkhi et al. (2011), establecen contenidos de almidón en la harina de cáscara de plátano de 61.3 - 83%, dependiendo de la variedad y grado de madurez. Igualmente, indican que la harina de cáscara de plátano es rica en gránulos de almidón, con características y propiedades similares a los de almidón aislado, siendo considerada una alternativa menos costosa e igualmente funcional que otras fuentes de almidón. El contenido de almidón baja de 70%, aproximadamente, a menos de 1% después de la maduración, debido a que los azúcares presentes en la cáscara aumentan, al igual que la actividad enzimática. Las enzimas presentes generan una degradación del almidón, que da lugar a la formación y acumulación de azúcares solubles (Alkarkhi et al. 2011). En el Cuadro 7, se pueden observar los resultados de

absorbancia obtenido para cada concentración conocida. Así mismo, en la Figura 3 se determina la curva estándar utilizada en la cuantificación de almidón de la harina de cáscara de platano.

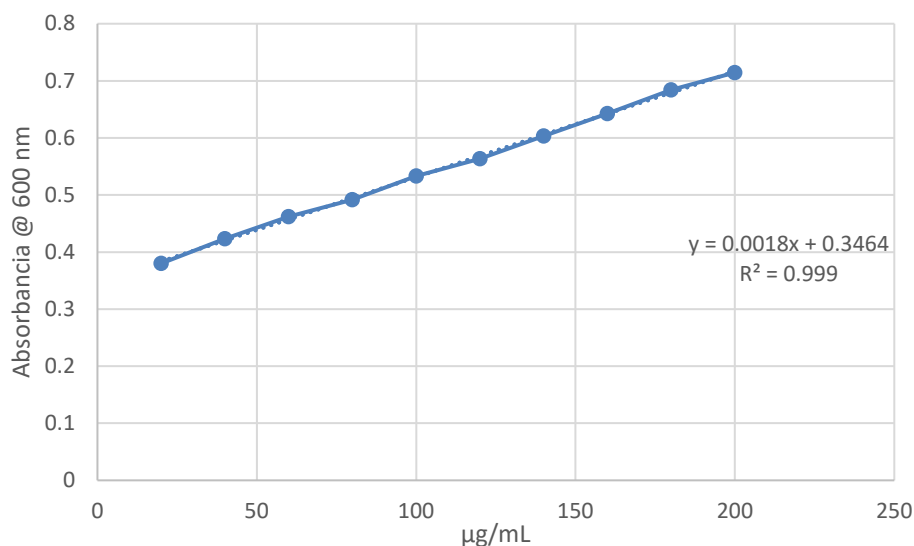
Cuadro 7

Datos de absorbancia obtenidos para almidón de tapioca.

Concentración ($\mu\text{g/mL}$)	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
Absorbancia (@600 nm)	0.380	0.423	0.462	0.491	0.533	0.563	0.603	0.642	0.684	0.714

Figura 3

Curva estándar de almidón de tapioca.



Los resultados de absorbancia de la harina de cáscara de plátano se muestran en el Cuadro 8. Esta lectura fue realizada por duplicado. Para determinar la concentración de almidón en la muestra; se utilizó la Ecuación 17, de regresión de la curva estándar descrita anteriormente.

$$Y = 0.0018x + 0.3464 \quad [17]$$

Con los datos de absorbancia obtenidos, se despejó el valor de x , con el objetivo de obtener la concentración expresada en $\mu\text{g/mL}$ o ppm. Se tomó en cuenta el factor de dilución (FD) utilizado, el cual fue de cuatro. En la Ecuación 18 se muestra el cálculo mencionado anteriormente.

$$0.13351 = 0.0018x + 0.3464 \quad [18]$$

$$\frac{(F.D * 0.13351) - 0.3464}{0.0018} = x$$

$$x = 104.24 \text{ ppm}$$

La Ecuación 19, utilizada para determinar la cantidad de almidón, expresada en porcentaje, presente en la muestra de harina de cáscara de plátano y el blanco positivo de almidón de tapioca se describe a continuación (Anchundia et al. 2016).

$$\% \text{ Almidón Total} = \frac{C \text{ almidón} \left(\frac{\mu\text{g}}{\text{mL}} \right) \times \text{Volumen inicial} \times 100 \times 0.9}{1000 \times W} \quad [19]$$

Donde:

C almidón = en $\mu\text{g}/\text{mL}$ (ppm) de la solución.

Volumen inicial = volumen con que se inició el proceso de gelatinización de almidón (100 mL).

W = Peso de la muestra de almidón analizada en mg.

0.9 = factor de corrección de porcentaje de glucosa a porcentaje de almidón.

Cuadro 8

Cuantificación de almidón total presente en harina de cáscara de plátano y almidón de tapioca.

Muestra	Absorbancia (@600 nm)	Concentración de almidón (ppm)	% Almidón Total	Media \pm D.E. (%p/p)	C.V. (%)
Tapioca A	0.13351	104.24	46.94*	46.5 \pm 0.61	1.32
Tapioca B	0.13264	102.36	46.07*		
Harina de cáscara de plátano A	0.16477	173.76	78.2	77.40 \pm 1.13	1.46
Harina de cáscara de plátano B	0.16317	170.21	76.6		

*Nota. C.V.: Coeficiente de Variación. D.E: Desviación Estándar. * Porcentaje obtenido a partir de la concentración 100 $\mu\text{g}/\text{mL}$. El porcentaje esperado para almidón de tapioca (blanco positivo) es 50%.*

Análisis de la Película Biodegradable

Grosor

La uniformidad en el grosor de biopelículas desarrolladas mediante la técnica de vaciado en placa (casting) depende de diversos factores, entre los cuales la concentración de almidón es altamente determinante. Soluciones con concentraciones bajas de almidón (< 3%), gelifican con mucha dificultad, esto produce películas con grosores deficientes. Por otro lado, si la solución presenta una alta viscosidad, influirá negativamente al proceso de verter la solución filmogénica, obteniendo desuniformidades en el espesor final de la película (Espinoza y Puglisevich 2019). Así mismo, el grosor final dependerá del método de preparación, generalmente, películas elaboradas por medio del método de vertido y secado en placas de vidrio presentan grosores menores (Moreno et al. 2012).

Anchundia et al. (2016), obtuvieron resultados de grosor entre 0.11 y 0.17 mm, datos muy comparables a los de este estudio. En el Cuadro 9, se encuentran los resultados con relación al porcentaje de glicerol empleado, con una variación de 0.11 a 0.22 mm. El tratamiento seis presentó la media con mayor diferencia estadística, este tratamiento es un punto axial ($+\alpha$) de la variable glicerol. Los tratamientos cinco y seis tuvieron, respectivamente, los datos más bajos y más altos del estudio. La diferencia en el grosor está directa y proporcionalmente relacionada con la cantidad de sólidos totales aportados por el glicerol al momento de secar la solución filmogénica, este plastificante presenta mayor influencia en el grosor en comparación con la otra variable estudiada. Según Moreno et al. (2012), el grosor depende del peso molecular del plastificante, siendo el glicerol el plastificante con menor peso molecular, comparados con otros como el sorbitol. Es decir, que el aporte de sólidos del plastificante usado es menor.

Adicionalmente, en el Cuadro 9, se puede observar que los tratamientos siete y ocho fueron influenciados por el contenido de pectina y alginato de sodio. Al aumentar el contenido de pectina aumentó el grosor, debido las propiedades coloidales únicas de los compuestos usados. Por otro lado, al aumentar la cantidad de alginato de sodio, el grosor disminuyó. Estos resultados pueden atribuirse

a la diferencia en el arreglo interno de las gomas usadas y a la habilidad de retener agua. La red estructural de la pectina es menos organizada que la del alginato de sodio, esto le permite formar, con mayor facilidad, cadenas con el glicerol, aumentando su grosor (Galus y Lenart 2013).

Cuadro 9

Efecto de las variables independientes sobre el grosor de las biopelículas.

Tratamientos	%Glicerol	%Pectina:Alginato de sodio	Grosor [¥] (mm) ± D.E	C.V.%
1	4.5	60:40	0.16 ± 0.004	3.01
2	4.5	80:20	0.15 ± 0.010	6.42
3	10.5	60:40	0.17 ± 0.009	5.51
4	10.5	80:20	0.14 ± 0.008	6.51
5	3.26	70:30	0.11 ± 0.006	6.05
6	11.74	70:30	0.22 ± 0.017	8.12
7	7.5	55.86:44.14	0.18 ± 0.007	4.15
8	7.5	84.14:15.86	0.19 ± 0.008	4.35
9 ©	7.5	70:30	0.17 ± 0.010	6.24
10 ©	7.5	70:30	0.17 ± 0.006	3.64
11 ©	7.5	70:30	0.17 ± 0.013	8.19
12 ©	7.5	70:30	0.16 ± 0.010	6.31
13 ©	7.5	70:30	0.17 ± 0.011	6.62
14 ©	7.5	70:30	0.16 ± 0.010	6.46
% Coeficiente de variación (C.V.)			15.00%	

Nota. © Puntos centrales. D.E: Desviación Estándar. ¥: Media.

Se realizaron pruebas estadísticas para determinar cuáles de las variables influyeron sobre el grosor de la película biodegradable (Cuadro 10). Las variables lineales y cuadráticas de glicerol y relación pectina: alginato de sodio fueron significativas ($P < 0.1$), mostrando un efecto lineal y cuadrático en el incremento del grosor. La interacción de ambas variables muestra que los valores de una variable influyeron a la otra variable en función de la variable respuesta. El R^2 obtenido fue de 0.42, estableciendo que el 42% de los datos se ajustaron al modelo cuadrático y el 58% no se ajustaron a dicho modelo. Consecuentemente, el modelo se consideró tendencioso (Rocha 2009). Se pudo apreciar un comportamiento equivalente en la Figura 4.

Cuadro 10

Estadígrafos del modelo de regresión polinomial para el grosor de las biopelículas.

Variable	Coefficientes de Regresión	Valor P
Intercepto	0.222519	0.054092*
X ₁	0.031328	0.000068*
X ₁ ²	-0.000602	0.020108*
X ₂	-0.005311	0.087861*
X ₂ ²	0.000048	0.031126*
X ₁ X ₂	-0.000229	0.025690*
R ²		0.42

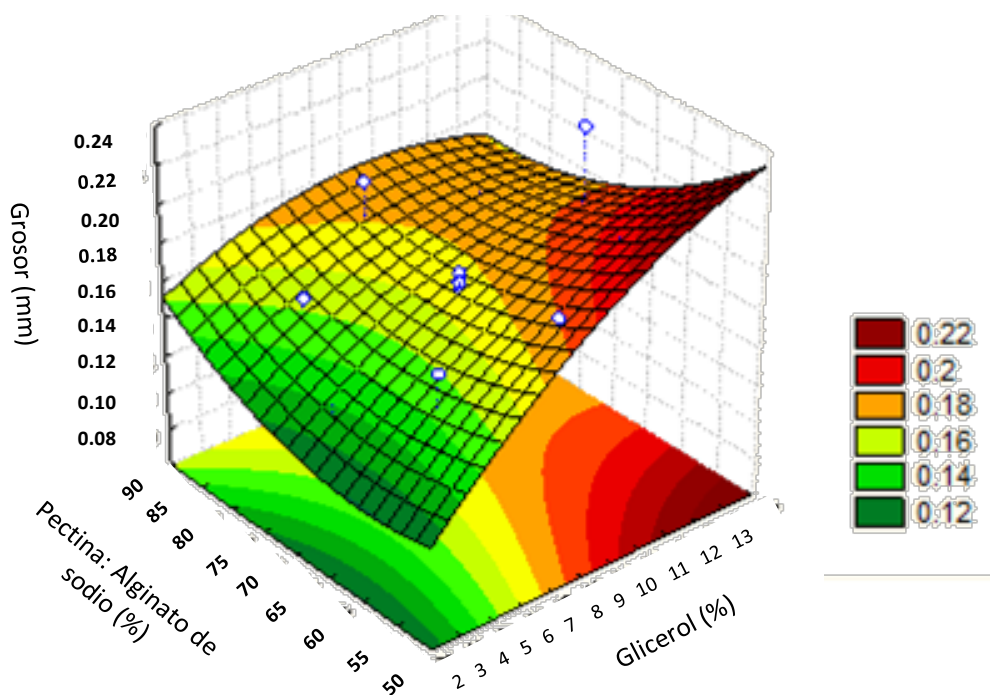
Nota. *: Posee diferencia significativa en el modelo (P < 0.1). R²: Coeficiente de determinación. X₁: % Glicerol. X₂: % Pectina: Alginato de sodio

Con base en las significancias del análisis de regresión (Cuadro 10), se determinó la Ecuación 20 para predecir los valores de grosor en las películas biodegradables elaboradas:

$$\text{Grosor (mm)} = 0.22 + 0.031X_1 - 0.0053X_2 - 0.000602 X_1^2 + 0.000048 X_2^2 - 0.000229 X_1X_2 \quad [20]$$

Figura 4

Efecto de las variables independientes sobre el grosor de las biopelículas.



Color (ΔE)

El color es uno de los parámetros más importantes que debe de ser controlado en la industria alimentaria. Las biopelículas y recubrimientos deben ser lo más incoloros posibles para simular la apariencia de plásticos poliméricos comunes. Un cambio en el color de la superficie de las películas puede ser un indicador del entrecruzamiento de las moléculas que forman la biopelícula. Los atributos de color son de gran importancia, ya que influyen directamente en la aceptabilidad del consumidor (Galus y Lenart 2013).

Los resultados obtenidos en el análisis de diferencia de color se presentan en el Cuadro 11. Se observaron diferencias en un intervalo de 2.02 hasta 14.51. Se utilizó un control sin adicionar cáscara de plátano para establecer la diferencia de color. Galus y Lenart (2013) desarrollaron películas biodegradables con pectina y alginato de sodio y observaron que las películas presentaron colores claros y transparentes. Los tratamientos con menor diferencia de color fueron el siete y ocho, los cuales fueron desarrollados con mayor porcentaje de gomas, obteniendo valores de ΔE similares a la investigación mencionada anteriormente. Por otra parte, los tratamientos con mayor cambio de color corresponden a los tratamientos cuatro y seis, los cuales contenían mayor cantidad de glicerol. Según Michaca (2004), conforme se incrementa el glicerol, aumenta la intensidad del color, esto resulta ser un factor poco favorable para los aspectos de opacidad de la película.

Cuadro 11

Efecto de las variables independientes sobre el ΔE de las biopelículas.

Tratamientos	%Glicerol	%Pectina:Alginato de sodio	$\Delta E^{\text{¥}}$
1	4.5	60:40	9.97
2	4.5	80:20	7.55
3	10.5	60:40	5.30
4	10.5	80:20	12.97
5	3.26	70:30	8.47
6	11.74	70:30	14.51
7	7.5	55.86:44.14	4.22
8	7.5	84.14:15.86	2.02
9 ©	7.5	70:30:	6.58
10 ©	7.5	70:30	5.13
11 ©	7.5	70:30	6.41
12 ©	7.5	70:30	6.33
13 ©	7.5	70:30	6.35
14 ©	7.5	70:30	5.72
% Coeficiente de Variación (C.V.)			45.95%

Nota. © Puntos centrales. ¥: Media

Los coeficientes de regresión y la probabilidad se describen en el Cuadro 12. En el nivel lineal, el glicerol presentó un efecto negativo en la diferencia de color, al igual que el nivel cuadrático de la relación pectina: alginato de sodio. Se puede observar, que el glicerol presentó mayor influencia en la variable respuesta, tanto en el modelo lineal como en el cuadrático. El modelo presentó un R^2 de 0.83, estableciendo que el 83% de los datos se ajustaron al modelo cuadrático y el 17% no se ajustaron a dicho modelo, concluyendo que el modelo es predictivo (Rocha 2009). En la Figura 5, se puede observar el comportamiento de las variables.

Cuadro 12

Estadígrafos del modelo de regresión polinomial para el ΔE de las biopelículas.

Variable	Coefficiente de regresión	Valor P
Intercepto	12.3607	0.32006 ^{ns}
X ₁	-10.6914	0.001924*
X ₁ ²	0.3462	0.000022*
X ₂	0.8981	0.230199 ^{ns}
X ₂ ²	-0.0107	0.003248*
X ₁ X ₂	0.0841	0.000264*
R ²		0.83

Nota. * Posee diferencia significativa en el modelo (P < 0.1). ^{ns}: No significativo. R²: Coeficiente de determinación. X₁: %Glicerol. X₂: % Pectina:

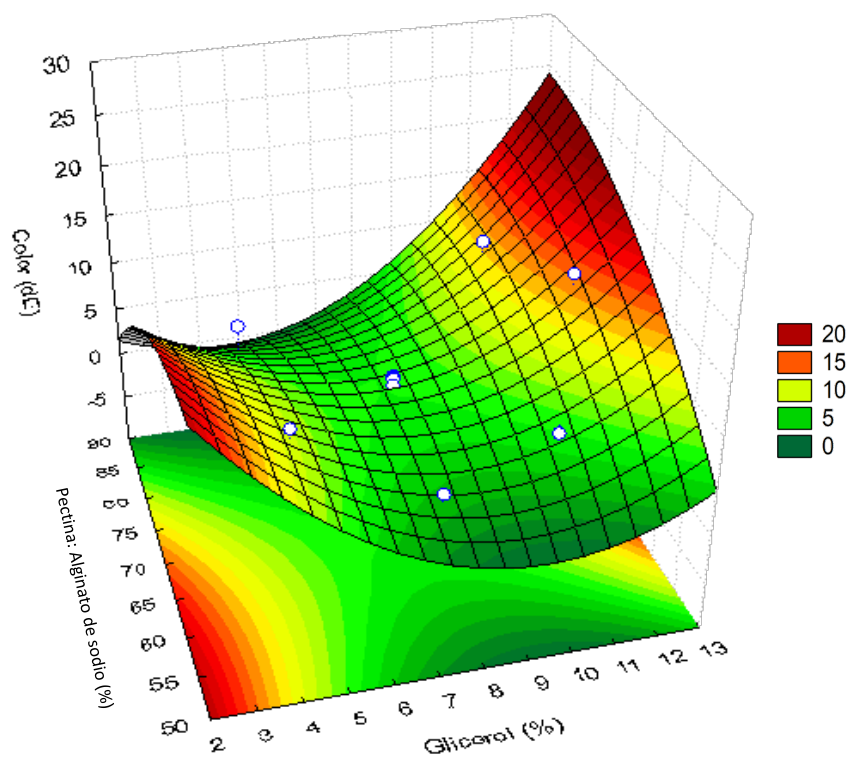
Alginato de sodio.

Con base en las significancias del análisis de regresión (Cuadro 12), se determinó la Ecuación 21 para predecir los valores de la diferencia de color en las biopelículas elaboradas:

$$\Delta E = -10.6914X_1 + 0.3462X_1^2 - 0.0107X_2^2 + 0.0841X_1X_2 \quad [21]$$

Figura 5

Efecto de las variables independientes sobre el ΔE de las biopelículas.



Humedad (%)

Según la norma ASTM 6980, el porcentaje de humedad de un plástico convencional desarrollado a partir de petróleo debe ser menor a 1%. Esta diferencia, con respecto a películas biodegradables, se debe al método empleado, dado que es un método por moldeo, y no por extrusión o prensado, como se desarrollan los plásticos petroquímicos. El almidón y los polioles son hidrófilos y la humedad puede ser absorbida en la matriz de la película, no obstante, al mantener constante el contenido de almidón, el plastificante juega un papel más importante en el aumento de este parámetro. Zhang y Han (2006), en su investigación de películas plastificadas a partir de polioles y monosacáridos, obtuvieron datos de humedad entre 25.3 y 52.3% al utilizar glicerol, datos mucho más altos comparados con películas plastificadas a partir de otros monosacáridos y sorbitol. No obstante, los datos obtenidos en esta investigación fueron mucho mayores a los reportados por otros autores, esto se atribuye a la presencia de la pectina. La pectina, al igual que el glicerol, es un polímero que incrementa las características higroscópicas de la biopelícula.

El glicerol actúa como un compuesto que retiene agua y que aporta mayor cantidad de espacios moleculares capaces de reaccionar con el almidón y formar puentes de hidrogeno. Así mismo, las gomas también influyen, en menor medida, al aumento de la humedad (Seixas et al. 2013).

En el Cuadro 13, se encuentran los resultados con relación al porcentaje de glicerol empleado, con una variación de 55.83% hasta 81.06%. El tratamiento seis, presentó la media con mayor diferencia estadística, este tratamiento es un punto axial (+ α) de la variable glicerol. El efecto de este estudio reafirma que el uso de plastificantes es imprescindible en la realización de biopelículas, ya que este compuesto desconecta las cadenas de amilopectina; evitando que adquieran una estructura cristalina, frágil y quebradiza. En este punto, se forman enlaces de hidrógeno entre las moléculas añadidas del plastificante y almidón. Sin embargo, al realizar este estudio y al tomar en cuenta las características del almidón de cascara de plátano, el cual es considerado tipo C por tener una estructura semicristalina y contenido relativamente alto de amilosa, no se requiere de mucha cantidad

de glicerol para plastificar, ya que la amilosa expone enlaces de hidrogeno más fuertes, debido a la elevada cantidad de cadenas lineales (Nuñez 2003).

Cuadro 13

Efecto de las variables independientes sobre la humedad de las biopelículas.

Tratamientos	%Glicerol	%Pectina:Alginato de sodio	Humedad (%) [¥]
1	4.5	60:40	62.48
2	4.5	80:20	63.31
3	10.5	60:40	79.47
4	10.5	80:20	78.52
5	3.26	70:30	55.83
6	11.74	70:30	81.06
7	7.5	55.86:44.14	74.52
8	7.5	84.14:15.86	68.54
9 ©	7.5	70:30	74.57
10 ©	7.5	70:30	69.84
11 ©	7.5	70:30	62.82
12 ©	7.5	70:30	63.64
13 ©	7.5	70:30	68.00
14 ©	7.5	70:30	65.30
% Coeficiente de Variación (C.V.)			10.89%

Nota. © Puntos centrales. ¥: Media.

Se realizaron pruebas estadísticas para determinar cuáles de las variables influyeron sobre la humedad de la película biodegradable (Cuadro 14). Solamente la variable lineal de glicerol presentó diferencias significativas ($P < 0.1$), mostrando un efecto lineal positivo en el incremento de humedad. La interacción de ambas variables muestra que el valor de una variable influyó en la otra variable en función de la variable respuesta. El R^2 obtenido fue de 0.85, estableciendo que el 85% de los datos se ajustaron al modelo cuadrático y el 15% no se ajustaron a dicho modelo, consecuentemente, el modelo se consideró predictivo (Rocha 2009). Se apreció un comportamiento equivalente en la Figura6.

Cuadro 14

Estadígrafos del modelo de regresión polinomial para la humedad de las biopelículas.

Variable	Coefficiente de regresión	Valor P
Intercepto	156.3837	0.140652 ^{ns}
X ₁	1.4555	0.002844*
X ₁ ²	0.0869	0.650460 ^{ns}
X ₂	-3.1306	0.448715 ^{ns}
X ₂ ²	0.0232	0.211703 ^{ns}
X ₁ X ₂	0.001	0.989671 ^{ns}
R ²		0.85

Nota. *Posee diferencia significativa en el modelo (P<0.1). ^{ns} No significativo. R²=Coeficiente de determinación. X₁: % glicerol. X₂: % Pectina:

alginato de sodio.

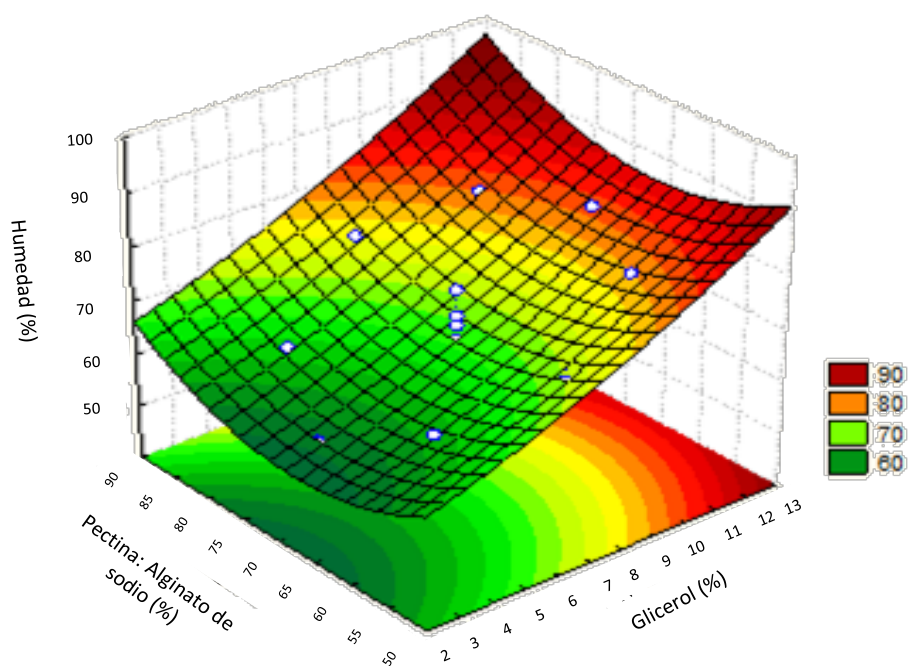
Con base en las significancias del análisis de regresión (Cuadro 14), se determinó la Ecuación

22 para predecir los valores de humedad de las películas biodegradables:

$$\text{Humedad (\%)} = 1.4555X_1 \quad [22]$$

Figura 6

Efecto de las variables independientes sobre la humedad de las biopelículas.



Permeabilidad al Vapor de Agua (PVA) (g/m.h.kPa)

La permeabilidad al vapor de agua es la propiedad más estudiada en películas biodegradables, debido a la importante función que desempeña el agua en reacciones de deterioro de los alimentos. Mientras más bajos sean los valores de permeabilidad, la biopelícula será considerada una alternativa eficiente para el empaque de alimentos, ya que esté no perderá peso por deshidratación y conservará sus propiedades nutricionales y sensoriales durante más tiempo. Anchundia et al. (2016), al realizar biopelículas con cáscara de plátano y ácido acetilsalicílico, obtuvieron permeabilidades similares a las de este estudio, siendo $2.08E-03$ g/h.m.kPa la menor permeabilidad obtenida en esta investigación de referencia. Así mismo, la permeabilidad obtenida en este estudio presentó valores más bajos en comparación con biopelículas realizadas con almidón de yuca ($9.54E-02$ g/h.m.kPa), esto puede estar relacionado con la diferencia en la estructura de los tipos de almidón utilizados (Arévalo et al. 2018). Cada tipo de almidón tendrá un comportamiento diferente con respecto a la cantidad de glicerol necesario para plastificar y formar un polímero.

En el Cuadro 15 se encuentran los resultados con relación al porcentaje de glicerol empleado, con una variación de $8.301E-04$ g/h.m.kPa hasta $1.623E-03$ g/h.m.kPa. Los tratamientos cinco y seis presentaron la media con mayor diferencia estadística, este tratamiento es un punto axial ($+\alpha$) de la variable glicerol. Los valores más altos de PVA son justificados al aumentar el porcentaje de plastificante. La inclusión de moléculas de glicerol entre las cadenas del polímero, aumentan el espacio molecular entre ellas, facilitando la difusión de agua en la biopelícula (Seixas et al. 2013).

La permeabilidad al vapor de agua es un parámetro relacionado con el espesor de la película. A medida que aumenta el grosor, se incrementa la resistencia a la transferencia de masa a través del material, en consecuencia, la presión parcial del vapor del agua de equilibrio en la capa inferior se incrementa. Este grosor varía a medida que se realiza el análisis, debido al hinchamiento del polímero provocado por el agua (Argueta Miranda 2019). Galus y Lenart (2013), encontraron relación significativa en el uso de pectina y alginato en la formación de películas. Las películas con mayor

contenido de alginato obtuvieron valores de permeabilidad más bajos en comparación con los obtenidos a partir de pectina. Ambas moléculas son consideradas barreras moderadas al vapor de agua, no obstante, el alginato de sodio al reaccionar con CaCl_2 , podría mejorar esta propiedad (Seixas et al. 2013).

Cuadro 15

Efecto de las variables independientes sobre PVA de las biopelículas.

Tratamientos	%Glicerol	%Pectina:Alginato de sodio	Permeabilidad al vapor de agua (g/m.h.kPa) [¥]
1	4.5	60:40	1.01E-03
2	4.5	80:20	1.22E-03
3	10.5	60:40	1.26E-03
4	10.5	80:20	1.47E-03
5	3.26	70:30	8.30E-04
6	11.74	70:30	1.62E-03
7	7.5	55.86:44.14	1.38E-03
8	7.5	84.14:15.86	1.41E-03
9 ©	7.5	70:30	1.21E-03
10 ©	7.5	70:30	1.28E-03
11 ©	7.5	70:30	1.29E-03
12 ©	7.5	70:30	1.18E-03
13 ©	7.5	70:30	1.23E-03
14 ©	7.5	70:30	1.16E-03
Coeficiente de variación (C.V.)			15.30%

Nota. © Puntos centrales. ¥: Media

Las pruebas estadísticas para determinar cuáles de las variables influyen sobre la permeabilidad al vapor de agua se presentan en el Cuadro 16. Las variables lineales de glicerol y relación pectina: alginato de sodio fueron significativas ($P < 0.1$). La interacción de ambas variables no presentó diferencia significativa, por lo tanto, el valor de una variable no influye en la otra variable en función de la variable respuesta. El R^2 obtenido fue de 0.22, estableciendo que el 22% de los datos se ajustaron al modelo cuadrático y el 78% no se ajustaron a dicho modelo. Por lo tanto, el modelo se consideró tendencioso (Rocha 2009). Se observa un comportamiento equivalente en la Figura 7.

Cuadro 16

Estadígrafos del modelo de regresión polinomial para PVA de las biopelículas.

Variable	Coefficiente de regresión	Valor P
Intercepto	0.004569	0.007590*
X ₁	0.000051	0.008355*
X ₁ ²	-0.000002	0.411800 ^{ns}
X ₂	-0.000099	0.050438*
X ₂ ²	0.000001	0.017353*
X ₁ X ₂	0.000000	0.958159 ^{ns}
R ²		0.22

Nota. * Posee diferencia significativa en el modelo (P<0.1). ^{ns} No significativo. R²=Coeficiente de determinación. X₁: % Glicerol. X₂: %Pectina:

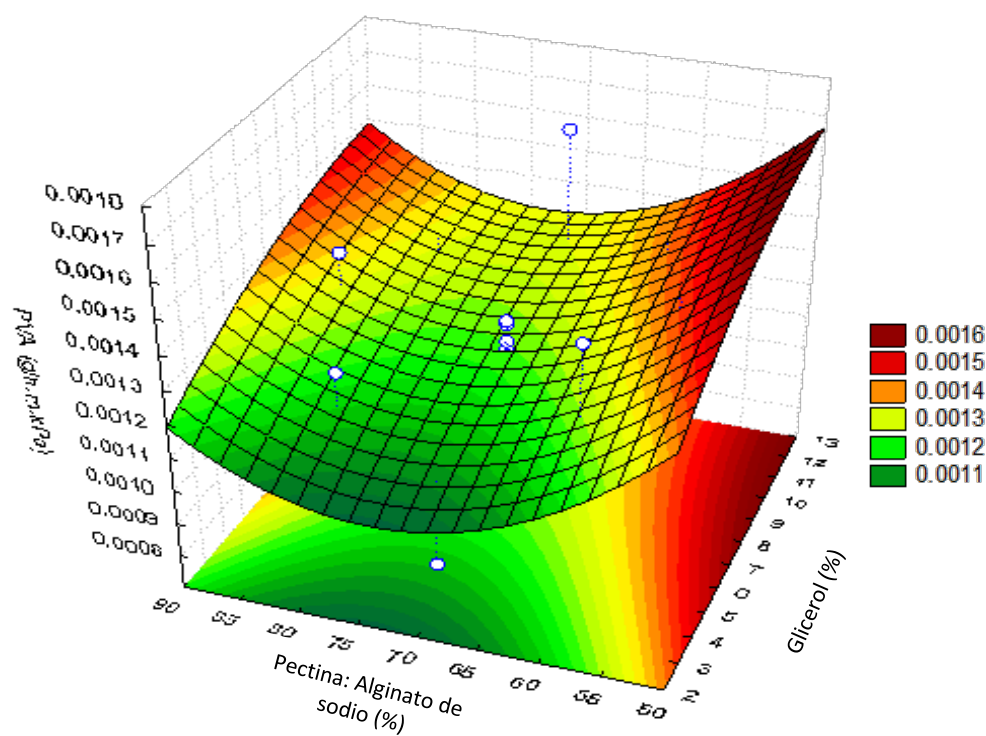
Alginato de sodio

Con base en las significancias del análisis de regresión (Cuadro 16), se determinó la Ecuación 23 para predecir los valores de permeabilidad al vapor de agua de las películas biodegradables:

$$\text{PVA (g/h.m.kPa)} = 0.004569 + 0.000051X_1 - 0.000099X_2 + 0.000001X_2^2 \quad [23]$$

Figura 7

Efecto de las variables independientes sobre PVA de las biopelículas.



Solubilidad (%)

La solubilidad se define como el porcentaje de materia seca de la biopelícula solubilizada después de 24 horas de inmersión en agua. La solubilidad nos permite determinar la aplicación de un material de empaque. Si una película se disuelve muy fácilmente en agua, esta es ideal para ser un recubrimiento o cubierta comestible. En caso contrario, si no se disuelve con facilidad es favorable para cubrir alimentos (Charro 2015). La solubilidad está muy relacionada con el contenido de amilosa-amilopectina del almidón utilizado, de la cantidad de glicerol y otros compuestos hidrofílicos agregados a la película.

Un mayor porcentaje de contenido de amilosa nos asegura mayor viscosidad, mayor solubilidad y mayor claridad del gel (Espinoza y Puglisevich 2019). Películas con almidón de cáscara de plátano, sin adicionar pectina y alginato, reportan porcentajes de solubilidad entre 48.20 y 55.97%, con un máximo de 5% de glicerol (Argueta Miranda 2019). García Vásquez (2017), reporta porcentajes con un rango aún mayor, entre 18-50% y establece una relación directamente proporcional entre la temperatura de almacenamiento y el porcentaje de solubilidad. Se observó que, a 80 °C, la alta energía térmica contribuye a la solubilización de las biopelículas; mientras que, a 25 °C, el agua solo se ejerce una presión osmótica.

En el Cuadro 17, se pueden observar porcentajes de solubilidad mayores a los reportados en otras investigaciones. Estos resultados están asociados con la cantidad de glicerol y gomas utilizados. El glicerol tiene una alta interacción con agua, aumentando su solubilidad y la penetración de agua en la membrana del biopolímero. La facilidad de penetración del glicerol adentro de la estructura del bioplástico y la alta presencia de grupos hidroxilos, produce un material altamente hidrofílico (Rejak et al. 2014). Al aumentar el contenido de pectina y disminuir el de alginato, se observó un aumento en la solubilidad, debido a que la pectina es un polímero altamente soluble en agua. En el Cuadro 17, se puede comprobar que, a niveles bajos de concentración de glicerol y pectina, se obtiene una solubilidad menor (Arteaga y Zavala 2018).

Cuadro 17

Efecto de las variables independientes sobre la solubilidad de las biopelículas.

Tratamientos	%Glicerol	%Pectina:Alginato de sodio	Solubilidad (%) [¥]
1	4.5	60:40	56.28
2	4.5	80:20	68.97
3	10.5	60:40	82.26
4	10.5	80:20	90.05
5	3.26	70:30	62.4
6	11.74	70:30	85.17
7	7.5	55.86:44.14	79.78
8	7.5	84.14:15.86	88.44
9 ©	7.5	70:30	90.64
10 ©	7.5	70:30	87.47
11 ©	7.5	70:30	83.8
12 ©	7.5	70:30	86.58
13 ©	7.5	70:30	94.54
14 ©	7.5	70:30	76.12
% Coeficiente de Variación (C.V.)			13.88%

Nota. © Puntos centrales. ¥: Media

En el Cuadro 18 se presentan las pruebas estadísticas usadas para determinar cuáles de las variables influyeron sobre la solubilidad. Las variables lineales de glicerol y relación pectina: alginato de sodio fueron significativas ($P < 0.1$), así como la variable cuadrática del porcentaje de glicerol. La interacción de ambas variables no presentó diferencia significativa, por lo tanto, el valor de una variable no influyó en la otra variable en función de la variable respuesta. El R^2 obtenido fue de 0.75, estableciendo que el 75% de los datos se ajustaron al modelo cuadrático y el 25% no se ajustaron a dicho modelo, por lo tanto, el modelo se consideró predictivo (Rocha 2009). Se observa un comportamiento equivalente en la Figura 8.

Cuadro 18

Estadígrafos del modelo de regresión polinomial para solubilidad de las biopelículas.

Variable	Coefficiente de regresión	Valor P
Intercepto	-164.89	0.252395 ^{ns}
X ₁	17.585	0.031500*
X ₁ ²	-0.836	0.022785*
X ₂	4.323	0.020703*
X ₂ ²	-0.023	0.358181 ^{ns}
X ₁ X ₂	-0.041	0.713107 ^{ns}
R ²		0.75

Nota. * Posee diferencia significativa en el modelo (P < 0.1). ^{ns} No significativo. R²=Coeficiente de determinación. X₁: % Glicerol. X₂: % Pectina:

Alginato de sodio

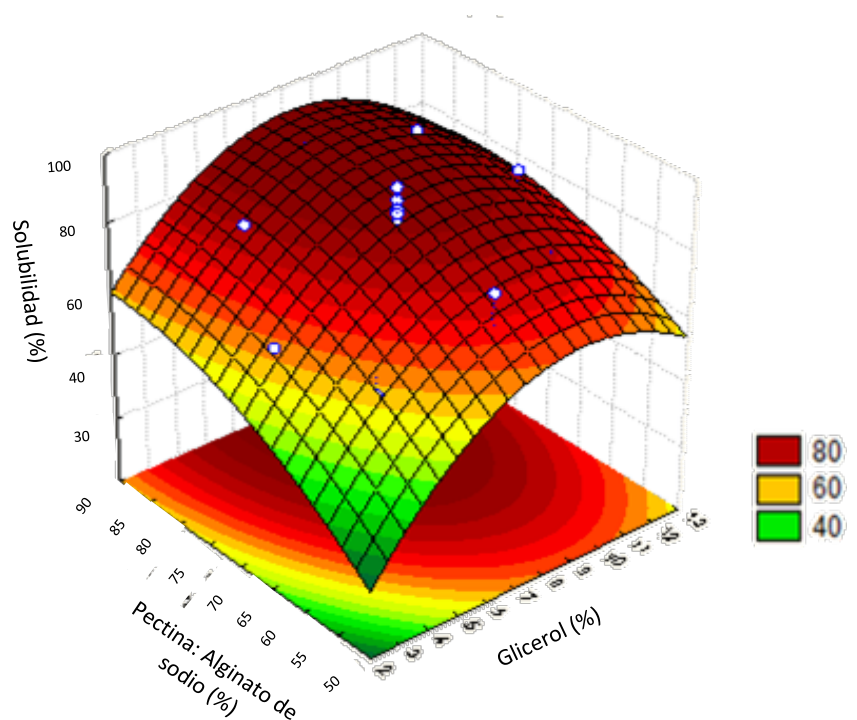
Con base en las significancias del análisis de regresión (Cuadro 18), se determinó la Ecuación

24 para predecir los valores de solubilidad (%) en las películas biodegradables:

$$\text{Solubilidad (\%)} = 17.585X_1 + 4.323X_2 - 0.836X_1^2 \quad [24]$$

Figura 8

Efecto de las variables independientes sobre la solubilidad de las biopelículas.



Resistencia a la perforación (N/mm)

Diversos estudios establecen la relación entre la resistencia a perforación y el grosor. Generalmente, la deformación en la rotura tiende a aumentar linealmente con el aumento del espesor de las películas, no obstante, en el Cuadro 19, se puede observar un comportamiento particular con respecto a esta variable, la cual se ve influenciada, en mayor medida, por el porcentaje de glicerol y la relación de pectina: alginato de sodio.

Huzaisham y Marsi (2020), desarrollaron un bioplástico a partir de cáscara de plátano con resistencia a la perforación de 21.117 a 34.477 N/mm, dependiendo de la concentración de cáscara de plátano utilizada. Los investigadores observaron que a medida que la concentración aumentaba, también la resistencia a la perforación lo hacía, sin embargo, si la concentración era excesiva la película se hacía más rígida, limitando este parámetro. En esta investigación, se observó un comportamiento similar, no obstante, los valores más bajos de resistencia a la perforación dependieron de varios factores.

En el Cuadro 19, se puede observar que a medida que disminuye la cantidad de glicerol y alginato de sodio, la resistencia a la perforación aumenta. La adición de glicerol promueve la movilidad de la cadena en la dirección de la deformación, aumentando los posibles puntos de perforación. Así mismo, el alginato de sodio presentó un comportamiento similar. El aumento constante de este componente disminuye la elasticidad, otorgándole una textura quebradiza a la biopelícula (Leceta et al. 2013).

Cuadro 19

Efecto de las variables independientes sobre la resistencia a la perforación de las biopelículas.

Tratamientos	%Glicerol	%Pectina:Alginato de sodio	Resistencia a la perforación (N/mm) [¥]
1	4.5	60:40	23.48
2	4.5	80:20	55.55
3	10.5	60:40	14.27
4	10.5	80:20	17.89
5	3.26	70:30	47.20
6	11.74	70:30	9.25
7	7.5	55.86:44.14	10.73
8	7.5	84.14:15.86	16.98
9 ©	7.5	70:30	11.89
10 ©	7.5	70:30	11.28
11 ©	7.5	70:30	10.94
12 ©	7.5	70:30	12.29
13 ©	7.5	70:30	11.42
14 ©	7.5	70:30	12.04
% Coeficiente de variación (C.V.)			75.60%

Nota. © Puntos centrales. ¥: Media

En el Cuadro 20 se presentan las pruebas estadísticas usadas para determinar cuáles de las variables influyeron sobre la solubilidad. Las variables lineales de glicerol y relación pectina: alginato de sodio fueron significativas ($P < 0.1$), así como las variables cuadráticas. La interacción de ambas variables presentó diferencia significativa, por lo tanto, el valor de una variable influyó en la otra, en función de la variable respuesta. El R^2 obtenido fue de 0.93, estableciendo que el 93% de los datos se ajustaron al modelo cuadrático y el 7% no se ajustaron a dicho modelo, consecuentemente, el modelo se consideró predictivo (Rocha 2009). Se observa un comportamiento equivalente en la Figura 9.

Cuadro 20

Estadígrafos del modelo de regresión polinomial para la resistencia a la perforación de las biopelículas.

Variable	Coefficiente de regresión	Valor P
Intercepto	78.90070	0.000644*
X ₁	-4.24738	0.0000001*
X ₁ ²	1.11023	0.000001*
X ₂	-1.5744	0.000026*
X ₂ ²	0.02792	0.000001*
X ₁ X ₂	-0.23709	0.000008*
R ²		0.93

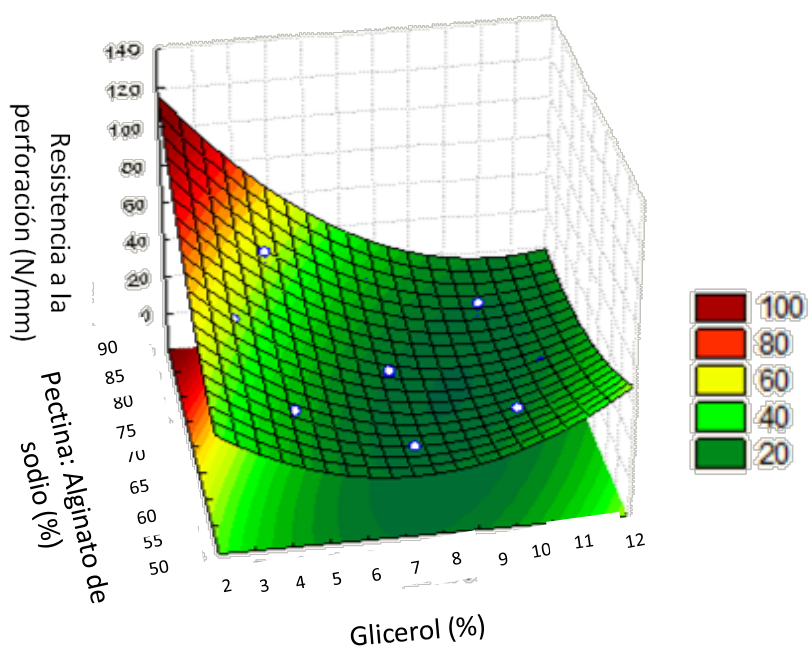
Nota. * Posee diferencia significativa en el modelo (P < 0.1). R²=Coeficiente de determinación. X₁: % Glicerol. X₂: %Pectina: Alginato de sodio

Con base en las significancias del análisis de regresión (Cuadro 20), se determinó la Ecuación 25 para predecir los valores de la resistencia a la perforación (N/mm) de las películas biodegradables:

$$\text{Resistencia a la perforación (N/mm)} = 78.9 - 4.24X_1 - 1.57X_2 + 1.11X_1^2 + 0.027X_2^2 - 0.237X_1X_2 \quad [25]$$

Figura 9

Efecto de variables independientes en la resistencia a la perforación de las biopelículas.



Fuerza de Tensión (MPa)

La película desarrollada en esta investigación presentó características plásticas, debido a las características propias del almidón de cáscara de plátano y por la adición de glicerol como plastificante. Generalmente, la inconsistencia en el parámetro de espesor es un factor que interviene negativamente en este análisis (Nizam et al. 2016).

Osorio y Rubiano (2019), en el desarrollo de biopelículas de cáscara de plátano y fibra natural, obtuvieron fuerzas de tensión entre un rango de 0.3375 y 1.66 MPa. García Vásquez (2017), en su estudio, determinó que el uso de ácido acético en el desarrollo de bioplásticos a partir de almidón de cáscara de plátano, aumentaba los valores de fuerza de tensión, obteniendo como valor mínimo 1.71 MPa y como valor máximo 3.81 MPa. En el Cuadro 21, se pueden observar valores similares. El tratamiento dos, presentó el valor más alto de fuerza de tensión (2.52 MPa) y el tratamiento tres, el valor más bajo (0.50 MPa).

Las propiedades mecánicas de las películas dependen en gran medida del tipo de materiales empleados en su elaboración, especialmente, de la habilidad del polímero de formar puentes moleculares estables entre las cadenas poliméricas. Se conoce que a medida que se aumenta el contenido de plastificante, la fuerza de tensión disminuye (Arévalo et al. 2018). La pectina y el alginato de sodio poseen mejores características para producir una estructura empaquetada más rígida, la cual presenta una mayor resistencia a la tracción (Makaremi et al. 2019). Como se mencionó anteriormente, al aumentar el glicerol aumenta el porcentaje de humedad, esto contribuye a la reducción de fuerzas entre moléculas adyacentes, debilitando la biopelícula.

Cuadro 21

Efecto de las variables independientes sobre la fuerza de tensión de las biopelículas.

Tratamientos	%Glicerol	% Relación Pectina:alginate de sodio	Fuerza de tensión (MPa) [¥]
1	4.5	60:40	1.25
2	4.5	80:20	2.52
3	10.5	60:40	0.51
4	10.5	80:20	0.70
5	3.26	70:30	1.60
6	11.74	70:30	0.56
7	7.5	55.86:44.14	0.79
8	7.5	84.14:15.86	0.56
9 ©	7.5	70:30	0.70
10 ©	7.5	70:30	0.56
11 ©	7.5	70:30	0.60
12 ©	7.5	70:30	0.76
13 ©	7.5	70:30	0.55
14 ©	7.5	70:30	0.62
% Coeficiente de variación (C.V.)			64.43%

Nota. © Puntos centrales. ¥: Media

En el Cuadro 22 se presentan las pruebas estadísticas usadas para determinar cuáles de las variables influyeron sobre la solubilidad. Las variables lineales de glicerol y relación pectina: alginate de sodio fueron significativas ($P < 0.1$), así como las variables cuadráticas. La interacción de ambas variables presentó diferencia significativa, por lo tanto, el valor de una variable influyó en la otra variable en función de la respuesta. El R^2 obtenido fue de 0.79, estableciendo que el 79% de los datos se ajustaron al modelo cuadrático y el 21% no se ajustaron a dicho modelo. En consecuencia, el modelo se consideró predictivo (Rocha 2009). Se observa un comportamiento similar en la Figura 10.

Cuadro 22

Estadígrafos del modelo de regresión polinomial para fuerza de tensión de las biopelículas.

Variable	Coefficiente de regresión	Valor P
Intercepto	3.727556	0.077809*
X ₁	-0.069691	0.000012*
X ₁ ²	0.035229	0.000144*
X ₂	-0.077368	0.004483*
X ₂ ²	0.001135	0.013797*
X ₁ X ₂	-0.008957	0.001316*
R ²		0.79

Nota. * Posee diferencia significativa en el modelo (P < 0.1). ^{ns} No significativo. R²=Coeficiente de determinación. X₁: % Glicerol. X₂: %Pectina:

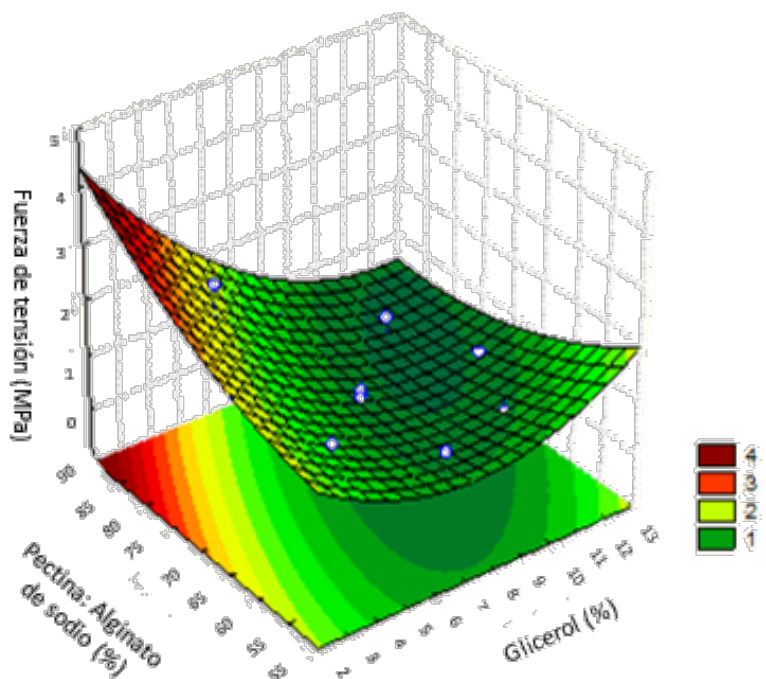
Alginato de sodio.

Con base en las significancias del análisis de regresión (Cuadro 22), se determinó la Ecuación 26 para predecir los valores de la fuerza de tensión (MPa) de las películas biodegradables:

$$\text{Fuerza de Tensión (MPa)} = 3.7275 - 0.069691X_1 + 0.035X_2^2 - 0.077368 X_2 + 0.0011X_2^2 - 0.0089X_1X_2 \quad [26]$$

Figura 10

Efecto de las variables independientes sobre la fuerza de tensión de las biopelículas.



Deformación (%)

La deformación se define como una relación entre elongación de la muestra antes de la ruptura y su longitud inicial (Muñoz 2014). Osorio y Rubiano (2019), encontraron porcentajes de deformación entre 5.03 y 22.98%, obteniendo resultados satisfactorios a una concentración de 4% de glicerol. En el Cuadro 23 se puede observar que el tratamiento uno presentó el valor más elevado para este parámetro. Demostrando que, a menor cantidad de glicerol y pectina, la diferencia entre la longitud inicial y final será menor, lo cual concluirá en un aumento de este porcentaje.

El estudio de Huzaisham y Marsi (2020), informaron que a medida que aumenta la cantidad de almidón en la mezcla, la biopelícula se volverá más rígida. Esta afirmación, también puede relacionarse con el aumento en el porcentaje de alginato, molécula que produce un material más rígido que disminuye la resistencia a la deformación.

Cuadro 23

Efecto de las variables independientes sobre la deformación de las biopelículas.

Tratamientos	%Glicerol	% Relación Pectina:alginato de sodio	Deformación (%) [¥]
1	4.5	60:40	31.07
2	4.5	80:20	23.75
3	10.5	60:40	18.38
4	10.5	80:20	12.55
5	3.26	70:30	28.35
6	11.74	70:30	25.68
7	7.5	55.86:44.14	24.48
8	7.5	84.14:15.86	21.10
9 ©	7.5	70:30	13.30
10 ©	7.5	70:30	13.65
11 ©	7.5	70:30	16.65
12 ©	7.5	70:30	16.40
13 ©	7.5	70:30	15.22
14 ©	7.5	70:30	13.55
% Coeficiente de Variación (C.V.)			31.33%

Nota. © Puntos centrales. ¥: Media

En el Cuadro 24 se presentan las pruebas estadísticas usadas para determinar cuáles de las variables influyeron sobre la solubilidad. Las variables lineales y cuadráticas de glicerol y relación

pectina:alginato de sodio fueron significativas ($P < 0.1$). La interacción de ambas variables no presentó diferencia significativa, por lo tanto, el valor de una variable no influyó en la otra variable en función de la variable respuesta. El R^2 obtenido fue de 0.80, estableciendo que el 80% de los datos se ajustaron al modelo cuadrático y el 20% no se ajustaron a dicho modelo. En consecuencia, el modelo se consideró predictivo (Rocha 2009). Se observa un comportamiento equivalente en la Figura 11.

Cuadro 24

Estadísticos del modelo de regresión polinomial para la deformación de las biopelículas.

Variable	Coefficiente de regresión	Valor P
Intercepto	231.6962	0.000625*
X_1	-10.7713	0.002910*
X_1^2	0.5830	0.000221*
X_2	-4.6955	0.002019*
X_2^2	0.0313	0.002402*
X_1X_2	0.0125	0.640089 ^{ns}
R^2		0.80

Nota. * Posee diferencia significativa en el modelo ($P < 0.1$). ^{ns} No significativo. R^2 =Coeficiente de determinación. X_1 : % Glicerol. X_2 : % Pectina:

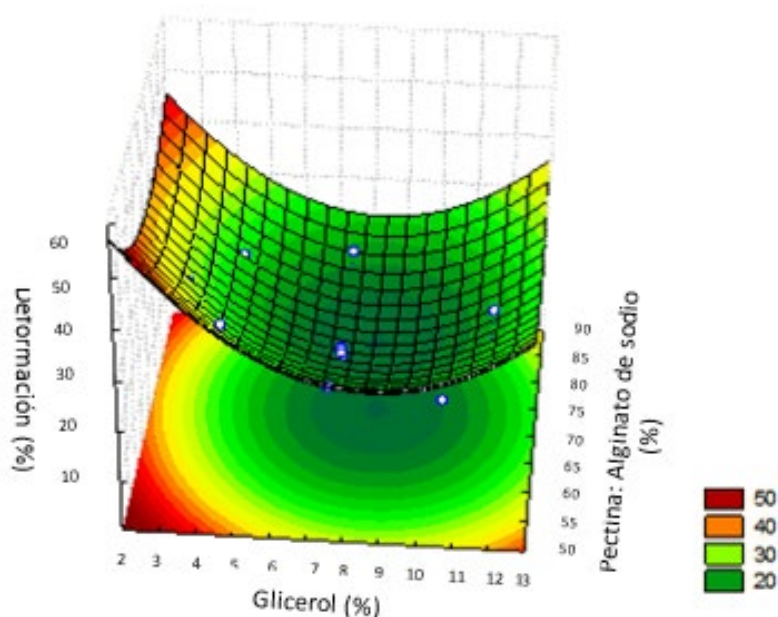
Alginato de sodio

Con base en las significancias del análisis de regresión (Cuadro 24), se determinó la Ecuación 27 para predecir los valores de deformación (%) de las películas biodegradables:

$$\text{Deformación (\%)} = 231.69 - 10.77X_1 - 4.69X_2 + 0.5830X_1^2 + 0.0313X_2^2 \quad [27]$$

Figura 11

Efecto de las variables independientes sobre deformación de las biopelículas.



Módulo de Young (MPa)

El módulo de Young es un indicador de rigidez y elasticidad de materiales plásticos preparados en condiciones normales de proceso. El módulo de Young se mide por la relación entre tensión antes de la ruptura y deformación. Nizam et al. (2016), en su estudio correspondiente al desarrollo de biopelículas a partir de cáscaras de plátano reportaron valores de módulo de Young entre 119.47 y 179.22 MPa. Estos valores son comparables con los obtenidos en esta investigación y son considerados valores elevados para este parámetro. Esto se debe a la composición química de la estructura de almidón de plátano, el cual contiene una cantidad significativa de amilosa, lo cual le confiere a la película buena resistencia mecánica pero poca flexibilidad. Es por lo que se deben utilizar otros compuestos en el proceso de realización de biopelículas. Por otro lado, Makaremi et al. (2019), en su estudio de empaques basados en alginato y pectina, establecieron que la combinación de estos compuestos produce un valor de módulo de Young mayor que el obtenido cuando actúan independientemente. En el Cuadro 25, se puede observar la mejor relación de estas variables,

demostrado que el tratamiento cuatro presentó las mejores condiciones para obtener un módulo de Young comparable con los estudios mencionados anteriormente.

Cuadro 25

Efecto de las variables independientes sobre el módulo de Young de las biopelículas.

Tratamientos	%Glicerol	% Relación Pectina:alginate de sodio	Módulo de Young (MPa) [¥]
1	4.5	60:40	58.22
2	4.5	80:20	79.25
3	10.5	60:40	93.64
4	10.5	80:20	170.99
5	3.26	70:30	96.74
6	11.74	70:30	51.81
7	7.5	55.86:44.14	66.88
8	7.5	84.14:15.86	73.57
9 ©	7.5	70:30	131.42
10 ©	7.5	70:30	125.08
11 ©	7.5	70:30	105.42
12 ©	7.5	70:30	111.20
13 ©	7.5	70:30	115.90
14 ©	7.5	70:30	134.93
% Coeficiente de Variación (C.V.)			33.10%

Nota. © Puntos centrales. ¥: Media

En el Cuadro 26 se presentan las pruebas estadísticas usadas para determinar cuáles de las variables influyeron sobre la solubilidad. La variable lineal de glicerol no fue significativa, es decir que, la respuesta de esta variable no siempre se comportó de la misma manera a medida que aumentó el glicerol. Las variables cuadráticas para glicerol y relación pectina: alginate de sodio fueron significativas ($P < 0.1$), así como la interacción de ambas variables, por lo tanto, el valor de una variable influyó en la otra variable en función de la variable respuesta. El R^2 obtenido fue de 0.46, estableciendo que el 46% de los datos se ajustaron al modelo cuadrático y el 54% no se ajustaron a dicho modelo. En consecuencia, el modelo se consideró tendencioso (Rocha 2009). Se observa un comportamiento equivalente en la Figura 12.

Cuadro 26

Estadígrafos del modelo de regresión polinomial para el módulo de Young de las biopelículas.

Variable	Coefficiente de regresión	Valor P
Intercepto	-736.36	0.026645*
X ₁	-3.303	0.111938 ^{ns}
X ₁ ²	-1.792	0.013360*
X ₂	23.209	0.022494*
X ₂ ²	-0.181	0.008367*
X ₁ X ₂	0.469	0.061049*
R ²		0.46

Nota. * Posee diferencia significativa en el modelo (P<0.1). ^{ns} No significativo. R²=Coeficiente de determinación. X₁: % Glicerol. X₂: %Pectina:

Alginato de sodio.

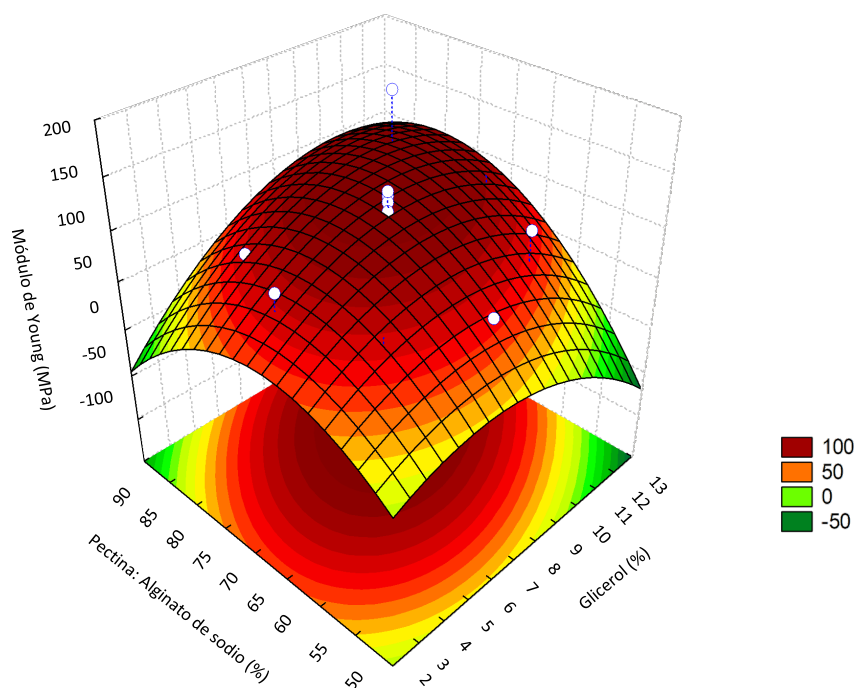
Con base en las significancias del análisis de regresión (Cuadro 26), se determinó la Ecuación

28 para predecir los valores de Módulo de Young (MPa) de las películas biodegradables:

$$\text{Fuerza de Tensión (MPa)} = -736.36 + 23.209X_2 - 1.792X_1^2 - 0.181X_2^2 + 0.469X_1X_2 \quad [28]$$

Figura 12

Efecto de las variables independientes sobre el módulo de Young de las biopelículas.



Biodegradabilidad (%)

Según la norma UNE-EN 13432, un material puede ser considerado biodegradable si se degrada como mínimo del 90% antes de 6 meses. En el Cuadro 27, se puede observar la textura del suelo del suelo utilizado para la degradación de la biopelícula de harina de cáscara de plátano y la composición del suelo original, antes de colocar la biopelícula (Tratamiento). Para ambas muestras, se puede observar una composición de arena, limo y arcilla muy similares; estos parámetros de textura influyen en la tasa de descomposición, ya que, los suelos con características porosas permiten la presencia de túneles que facilitan la distribución de microorganismos y almacenamiento de agua, contribuyendo en la velocidad de biodegradación.

A medida que se descomponen los residuos y la materia orgánica, los nutrientes como el nitrógeno, fósforo y azufre son liberados en formas que pueden ser aprovechadas por las plantas. En el Cuadro 28, se puede observar un aumento en todos los parámetros a excepción de fósforo, sodio y potasio. Esto se puede atribuir a la textura reportada, ya que en suelos arenosos el porcentaje de retención de potasio, especialmente, es muy bajo comparado con suelos arcillosos.

Cuadro 27

Caracterización el suelo utilizado en el análisis de biodegradación.

Muestra	Textura	g/100 g			pH
		Arena	Limo	Arcilla	
Suelo original	Franco Arenoso	60	24	16	6.43
Tratamiento*	Franco Arenoso	58	24	18	6.75

Nota. *Suelo en donde se degradó la biopelícula

Cuadro 28

Composición nutricional del suelo utilizado en el análisis de biodegradabilidad.

Muestra	g/100 g			mg/kg (extractable)				
	C.O.	M.O.	N _{Total}	P	K	Ca	Mg	Na
Suelo original	2.04	3.52	0.18	119	495	1629	117	12
Tratamiento*	2.74	4.72	0.24	95 ^a	475	2112	125	1

Nota. *Suelo en donde se degradó la biopelícula. C.O.: Carbono Orgánico. M.O.: Materia Orgánica. N_{Total}: Nitrógeno Total. P: fósforo. K:



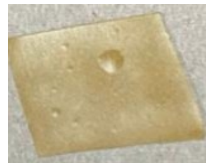















Potasio. Ca: Calcio. Mg: Magnesio. Na: Sodio.

En el Cuadro 29 se puede observar la cuantificación de la degradación de las biopelículas. Se siguió la variación en el peso del material biodegradable. Este análisis fue realizado para nueve tratamientos, exceptuando las cinco repeticiones del punto central, debido a que se quería observar la influencia del glicerol en el aumento del porcentaje de biodegradabilidad, principalmente.

Los resultados obtenidos para biodegradabilidad son comparables con los obtenidos por García Vásquez (2017), quien obtuvo porcentajes de biodegradabilidad entre 53.58 y 83.9% en biopelículas desarrolladas a partir de cáscaras de plátano y glicerol. En este estudio se presentó una biodegradabilidad arriba del 90% para el tratamiento seis y cuatro, los cuales presentaron los porcentajes de glicerol y pectina más altos. En el tratamiento cinco se observó el menor valor, coincidiendo con la menor cantidad de glicerol utilizado en todos los tratamientos evaluados. Estos resultados se pueden atribuir al porcentaje de humedad de los componentes utilizados, la presencia de microorganismos en el suelo y las condiciones climáticas. Sernaqué et al. (2020), reportaron que el glicerol reduce las fuerzas intermoleculares del almidón y en el proceso de plastificación se reduce el enlace interno de hidrógeno. Esta relación directamente proporcional entre el glicerol y la degradabilidad se puede deber a la baja resistencia y unión entre el glicerol y el almidón.

Cuadro 29

Porcentaje y muestra gráfica del área biodegradada de la biopelícula.

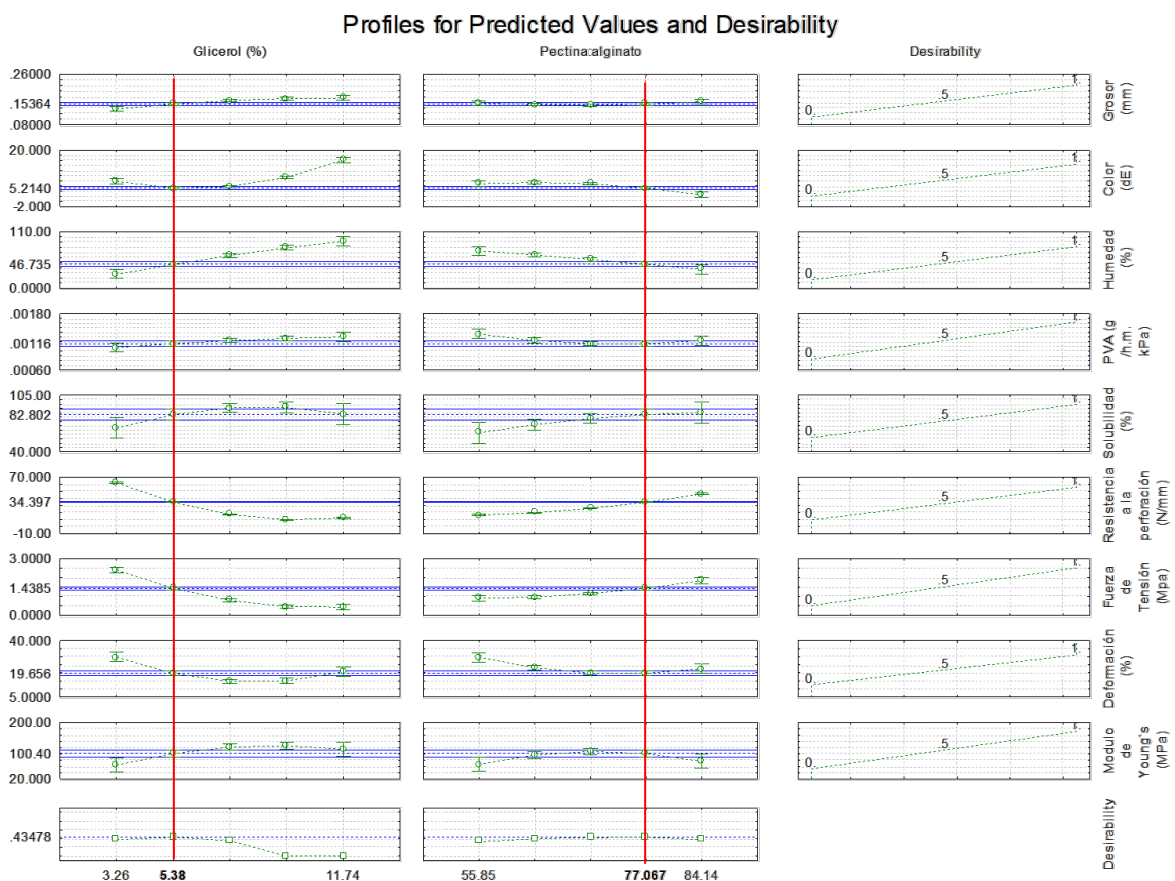
Tratamientos	Día 0	Día 12	Biodegradabilidad (%)
1			76.9
2			75.9
3			80.2
4			93.3
5			27.8
6			92.4
7			52.6
8			66.4
9			62.9

Función de Utilidad

En la Figura 13 se pueden observar los valores óptimos de las variables independientes sobre las diferentes respuestas consideradas, siendo estas: grosor, ΔE , humedad, permeabilidad al vapor de agua, solubilidad, resistencia a la perforación, fuerza de tensión, deformación y módulo de Young. Los valores encontrados fueron 5.38% de glicerol, 77.06% de pectina y 22.94% de alginato de sodio. Así mismo, en el Cuadro 30 se puede observar los resultados del tratamiento óptimo, presentando una mejora en la permeabilidad al vapor de agua, deformación, fuerza de tensión, módulo de Young y resistencia a la perforación.

Figura 13

Valores óptimos de la función de deseabilidad de la película biodegradable.



Cuadro 30

Resultados de las variables dependientes del tratamiento óptimo.

Variables dependientes	Resultados
Grosor (mm)	0.13
Color (ΔE)	11.04
Humedad (%)	62.46
Permeabilidad al vapor de agua (g/h.m.KPa)	9.76E-04
Solubilidad (%)	64.19
Resistencia a la perforación (N/mm)	58.08
Fuerza de tensión (MPa)	3.87
Deformación (%)	13.42
Módulo de Young (MPa)	173.80

Conclusiones

La harina de cáscara de plátano presenta alto contenido de almidón (74 -76%), lo cual, produce biopelículas estables con menor glicerol al requerido con otras materias primas.

Se determinó que la combinación de 5.38% glicerol y 2% de gomas, en una relación de 77% pectina y 23% de alginato de sodio, optimizan las propiedades de permeabilidad al vapor de agua, resistencia a la perforación, fuerza de tensión, deformación y módulo de Young.

Los porcentajes obtenidos en el análisis de biodegradabilidad de la película desarrollada (27.8 -93.3%), se encuentran dentro de los requisitos establecidos por la norma UNE-EN 13432 para ser considerado un empaque biodegradable.

Recomendaciones

Realizar el experimento evaluando diferentes porcentajes de almidón de cáscara de plátano para comparar con los resultados obtenidos en la metodología de superficie respuesta.

Evaluar la actividad antibacteriana de la biopelícula realizada por medio de un ensayo de zona de inhibición.

Referencias

- Aguilar MA. 2005. Propiedades físicas y mecánicas de películas biodegradables y su empleo en el recubrimiento de frutos de aguacate. Mexico D.F: Instituto Politecnico Nacional. 112 p; [consultado el 26 de may. de 2021]. https://repositoriodigital.ipn.mx/bitstream/123456789/10573/1/PTA_M_20050624_001.pdf.
- Alkarkhi AFM, Ramli SB, Yong YS, Easa AM. 2011. Comparing physicochemical properties of banana pulp and peel flours prepared from green and ripe fruits. *Food Chem.* 129(2):312–318. eng. doi:10.1016/j.foodchem.2011.04.060.
- Alves MI, Macagnan kL, Piecha CR, Torres MM, Perez IA, Kesserlingh SM, Rodrigues R, Díaz P, Moreira A. 2019. Optimization of *Ralstonia solanacearum* cell growth using a central composite rotational design for the P(3HB) production: Effect of agitation and aeration. *Plos One.* 14(1):1–13. doi:10.1371/journal.pone.0211211.
- Amini A, Birch J, Ahmed A. 2019. Production, application and health effects of banana pulp and peel flour in the food industry. *Journal of Food Science and Technology.* 56(2):548–559. doi:10.1007/s13197-018-03562-z.
- Anchundia K, Santacruz S, Coloma J. 2016. Physical characterization of edible films based on banana peel (*Musa Paradisiaca*). *Revista Chilena de Nutrición.* 43(4):394–399. doi:10.4067/S0717-75182016000400009.
- AOAC. 2000. Fiber (crude) in animal feed and peto food: Ceramic fiber filter method. [sin lugar]: [sin editorial]. 3 p. https://www.academia.edu/39799330/AOAC_962.09_FIBRE_CRUDE_IN_ANIMAL_FEED_AND_PET_FOOD.
- Aravas N, Laspidou CS. 2008. On the calculation of the elastic modulus of a biofilm streamer. *Biotechnol Bioeng.* 101(1):196–200. eng. doi:10.1002/bit.21865.

- Arévalo VL, Azucena GA, Laínez SE. 2018. Formulación y caracterización de una biopelícula comestible elaborada a partir de almidón de sorgo (*Sorghum bicolor L.*) y yuca (*Manihot esculenta*) [Tesis]. San Salvador, El Salvador: Universidad Nacional de El Salvador. 304 p. <https://cutt.ly/lmxuvfF>.
- Argueta Miranda MdIP. jun. 2019. Elaboración y caracterización de una biopelícula a partir de almidón de plátano verde (*Musa paradisiaca*) incorporando aceite esencial de orégano (*Origanum sp.*) como inhibidor microbiano en la preservación de fresas empacadas. [Tesis]. San Salvador, El Salvador: Universidad Nacional de El Salvador. 259 p. <https://cutt.ly/RmxuF8S>.
- Arteaga L, Zavala S. 2018. Fabricación de plásticos biodegradables a base de pectina-alginato y polímeros de *Agave* para su utilización en la industria alimentaria. Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos. 3:678–691. <http://www.fcb.uanl.mx/IDCyTA/files/volume3/4/10/112.pdf>.
- Ayala CE, Rivas GM, Zambrana CB. may. 2003. Estudio proximal comparativo de la cascara y pulpa del plátano (*Musa paradisiaca*) para su aprovechamiento completo en la alimentación humana y animal [Tesis]. San Salvador, El Salvador: Universidad Nacional de El Salvador. 86 p. <http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/5595/1/10122377.pdf>.
- Blasco G, Gómez F. 2014. Propiedades funcionales del plátano (*Musa sp.*). Veracruz, México: [sin editorial]. https://www.uv.mx/rm/num_anteriores/revmedica_vol14_num2/articulos/propiedades.pdf.
- Cesar A. 2018. Desarrollo, caracterización y validación de un bioplástico reforzado con orégano con acción antifúngica en alternaria (*Alternaria alternata*) [Tesis]. Honduras: Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano. 42 p; [consultado el 25 de may. de 2021]. <https://bdigital.zamorano.edu/bitstream/11036/6228/1/AGI-2018-T016.pdf>.
- Charro MM. 2015. Obtención de plástico biodegradable a partir de almidón de patata [Tesis]. Quito, Ecuador: Universidad Central del Ecuador. 109 p; [consultado el 24 de may. de 2021]. <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/3788/1/T-UCE-0017-97.pdf>.

- Eljarrat E. 2019. La contaminación química del plástico, una amenaza silenciosa. Barcelona, España: Infobae; [actualizado 2021; consultado el 4 de sep. de 2020]. <https://theconversation.com/la-contaminacion-quimica-del-plastico-una-amenaza-silenciosa-116669>.
- Espinoza FH, Puglisevich DC. 2019. Influencia del porcentaje de glicerol sobre la resistencia y deformación en tracción de plásticos biodegradables a base de almidón del tubérculo "*Manihot esculenta crantz*" [Tesis]. Trujillo, Perú: Universidad Nacional de Trujillo. 116 p. <https://cutt.ly/KmcEG28>.
- Galus S, Lenart A. 2013. Development and characterization of composite edible films based on sodium alginate and pectin. *Journal of Food Engineering*. 115(4):459–465. doi:10.1016/j.jfoodeng.2012.03.006.
- García Vásquez I. 2017. Determinación de concentración óptima de ácido acético-glicerol en la elaboración de plástico biodegradable a partir de almidón de cáscara plátano (*Musa paradisiaca*) en Pucallpa [Tesis]. Pucallpa, Perú: Universidad Nacional de Ucayali. 70 p; [consultado el 24 de may. de 2021]. <https://cutt.ly/omcE10V>.
- Giraldo-Gómez GI, Rodríguez-Barona S, Sanabria-González NR. 2019. Preparation of instant green banana flour powders by an extrusion process. *Powder Technology*. 353:437–443. doi:10.1016/j.powtec.2019.05.050.
- González Y, Meza JC, González O, Córdova J. 2013. Síntesis y biodegradación de polihidroxialcanoatos: plásticos de origen microbiano. *Revista Internacional de contaminación ambiental*. 29(1):75–115. <https://www.revistascca.unam.mx/rica/index.php/rica/article/view/28880/32433>.
- Grün G. 2016. 6 gráficos para entender el problema del plástico. Alemania: Deutsche well; [consultado el 4 de sep. de 2020]. <https://www.dw.com/es/6-gr%C3%A1ficos-para-entender-el-problema-del-pl%C3%A1stico/a-36756148>.
- Guadrón EN. 2019. Diseño y desarrollo del proceso para la extracción de almidón a partir de guineo majoncho verde (*musa sp. variedad cuadrado*), para su uso en la industria de alimentos [Tesis].

- San Salvador, El Salvador: Universidad Nacional de El Salvador. 220 p; [consultado el 25 de may. de 2021]. <https://cutt.ly/5mcRDWh>.
- Guimarães M, Matta F, Wanderlei C. 2012. Caracterização físico-química de filmes comestíveis de amido adicionado de acerola (*malpighia emarginata d.c.*). Química Nova. 35(3):346–552. doi:10.13140/2.1.1501.7607.
- Hadisoewignyo L, Foe K, Tjandrawinata R. 2017. Isolation and characterization of Agung banana peel starch from East Java Indonesia. International Food Research Journal; [consultado el 25 de may. de 2021]. 26(3):1324–1330. [http://www.ifrj.upm.edu.my/24%20\(03\)%202017/\(58\).pdf](http://www.ifrj.upm.edu.my/24%20(03)%202017/(58).pdf).
- Haro A, Borja A, Triviño S. 2017. Análisis sobre el aprovechamiento de los residuos del plátano, como materia prima para la producción de materiales plásticos biodegradables. Dominio de las Ciencias. 3(2):506–525. doi:10.23857/dc.v3i2.435.
- Huzaisham N, Marsi N. 2020. Utilization of banana (*musa paradisiaca*) peel as bioplastic for planting bag application. International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology; [consultado el 24 de may. de 2021]. 11(4):108–118. <https://ssrn.com/abstract=3598064>.
- Iguardia C. 2013. Síntesis y caracterización de bioplástico a partir de almidón de banano verde (*Musa sapientum* variedad Cavendish). [Tesis]. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala. 121 p.
- [INEC] Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. 2016. Información Ambiental en Hogares. Ecuador: Grupo Técnico DEAGA; [consultado el 23 de may. de 2021]. 39 p. <https://cutt.ly/SmcYb8V>.
- Kader NF, Wan L. 2017. The Development of Banana Peel/Corn Starch Bioplastic Film: A Preliminary Study. Bioremediation Science and Technology Research; [consultado el 23 de may. de 2021]. 5(1):12–17. <http://journal.hibiscuspublisher.com/index.php/BSTR>.
- Leceta I, Guerrero P, La Caba K de. 2013. Functional properties of chitosan-based films. Carbohydr Polym. 93(1):339–346. eng. doi:10.1016/j.carbpol.2012.04.031.

- Lim WS, Ock SY, Park GD, Lee IW, Lee MH, Park HJ. 2020. Heat-sealing property of cassava starch film plasticized with glycerol and sorbitol. *Food Packaging and Shelf Life*. 26(1):1–7. doi:10.1016/j.fpsl.2020.100556.
- Ly J, García A, Camino Y. 2013. Comportamiento de cerdos jóvenes alimentados con harina de residuos foliares de plátano (*Musa spp.*) incluida en concentrados. Nota técnica. *Revista Computadorizada de Producción Porcina*; [consultado el 25 de may. de 2021]. 47(1). <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193028545010>.
- Makaremi M, Yousefi H, Cavallaro G, Lazzara G, Goh CBS, Lee SM, Solouk A, Pasbakhsh P. 2019. Safely Dissolvable and Healable Active Packaging Films Based on Alginate and Pectin. *Polymers (Basel)*. 11(10). eng. doi:10.3390/polym11101594.
- Mazzeo M, Alzate A, Marín M. 2008. Obtención de almidón a partir de residuos poscosecha del plátano Dominicano Hartón (*Musa Simmonds*). *Vector*; [consultado el 25 de may. de 2021]. 3:57–69. http://vector.ucaldas.edu.co/downloads/Vector3_6.pdf.
- Michaca MÁ. 2004. Efecto de la adición de glicerol, como agente plastificante en las propiedades fisicoquímicas de las películas de zeína [Tesis]. Iztapalapa, México: Universidad Autónoma Metropolitana. 31 p; [consultado el 24 de may. de 2021]. <http://tesiuami.izt.uam.mx/uam/aspum/presentatesis.php?recno=11107&docs=UAMI11107.PDF>.
- Moreno A, Garay R, Guerrero J. 2012. Obtaining of biopelículas from the glycerin product of the process of transesterificación of oil of white pinion (*Jatropha curcas L.*). Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA). 1–8. <https://cutt.ly/bmclrf5>.
- Muñoz JM. oct. 2014. Evaluación, caracterización y optimización de un bioplástico a partir de la combinación de almidón de maíz, yuca y glicerol en sus propiedades físicas y de barrera [Tesis]. Francisco Morazan, Honduras: Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano. 58 p. <https://bdigital.zamorano.edu/bitstream/11036/3366/1/AGI-2014-T033.pdf>.

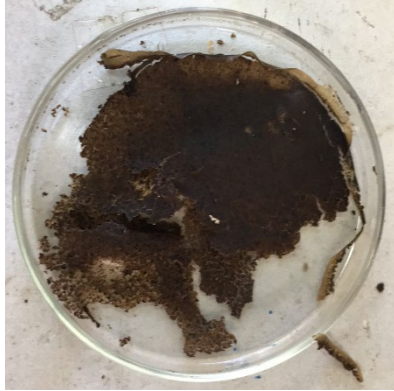
- Nimsung P, Thongngam M, Naivikul O. 2007. Compositions, morphological and thermal Properties of green banana flour and starch. *Kasetsart Journal-Natural Science*; [consultado el 25 de may. de 2021]. 41(5):324–327. <https://www.thaiscience.info/Journals/Article/TKJN/10471511.pdf>.
- Nizam M, Mohamed N, Ambong S. 2016. Biofilm derive from plantain peel: effect of mechanical properties. *RPN Journal of Engineering and Applied Sciences*; [consultado el 25 de may. de 2021]. 11(9):5852–9859. http://www.arpnjournals.org/jeas/research_papers/rp_2016/jeas_0516_4194.pdf.
- Nuñez FdM. 2003. Extraccion y caracterizacion del almidon de banano verde y de su residuo de pulpa [Tesis]. Honduras: Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano. 56 p; [consultado el 24 de may. de 2021]. <https://bdigital.zamorano.edu/bitstream/11036/1899/1/AGI-2003-T024.pdf>.
- Osorio AP, Rubiano KD. 2019. Desarrollo de una biopelícula partiendo de cáscara de banano banano y fibra natural como agente de refuerzo a nivel laboratorio [Tesis]. Bogotá, Colombia: Fundación Universidad de América. 113 p; [consultado el 24 de may. de 2021]. <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/7594/3/6131074-2019-2-IQ.pdf>.
- Paspuel A. 2016. Caracterización de un bioplástico de almidones de maíz y yuca con antocianinas de repollo morado (*Brassica oleracea*) como potencial indicador de pH [Tesis]. Honduras: Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano. 62 p; [consultado el 25 de may. de 2021]. <https://bdigital.zamorano.edu/bitstream/11036/5838/1/AGI-2016-T034.pdf>.
- Rejak A, Wójtowicz A, Oniszcuk T, Niemczuk D, Nowacka M. 2014. Evaluation of Water Vapor Permeability of Biodegradable Starch-Based Films. *Comission of monitorization and energetics in agriculture*; [consultado el 25 de may. de 2021]. 14(3):89–94. <https://cutt.ly/WmcOMW7>.
- Río F, Ochoa J, Díaz E, Roncal T. 2007. Bioplásticos. España: LEIA; [consultado el 2 de sep. de 2020]. https://www.researchgate.net/publication/257652567_BIOPLASTICOS.

- Rocha GO. 2009. Obtencao e caracterizao de films biodegradáveis a partir de misturas de amido de amndioca e extrato protéico de soja [Tesis]. Seropédica, Ríó de Janeiro: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. 75 p; [consultado el 24 de may. de 2021]. <https://cutt.ly/BmcO7JO>.
- Salmerón FI. 2019. Elaboración y caracterización de un material biodegradable utilizando desechos de lechuga de la Planta Poscosecha en la Escuela Agrícola Panamericana [Tesis]. Honduras: Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano. 58 p; [consultado el 25 de may. de 2021]. <https://bdigital.zamorano.edu/bitstream/11036/6505/1/AGI-2019-T053.pdf>.
- Seixas F, Turbiani F, Salomão P, Souza R, Gimenes M. 2013. Biofilms Composed of Alginate and Pectin: Effect of Concentration of Crosslinker and Plasticizer Agents. *Chemical Engineering Transactions*. 32:1693–1698. doi:10.3303/CET1332283.
- Sernaqué F, Huamán L, Pecho H, Chacón M. 2020. Biodegradability of bioplastics made from *Mangifera indica* and *Musa paradisiaca* peels. *Centro Agrícola*; [consultado el 9 de jun. de 2021]. 47(4):22–31. <http://scielo.sld.cu/pdf/cag/v47n4/0253-5785-cag-47-04-22.pdf>.
- Soto V. 2010. Cuantificacion de almidon total y de almidon resistente en harina de platano verde (*musa cavendishii*) y banana verde (*musa paradisiaca*). *Revista Boliviana de Química*; [consultado el 25 de may. de 2021]. 27(2):94–99. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=426339674004>.
- Vicentini NM. 2003. Elaboração e caracterização de filmes comestíveis à base de fécula de mandioca para uso em pós-colheita [Tesis]. Botucatu, Brasil: Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. 216 p; [consultado el 24 de may. de 2021]. https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/103261/vicentini_nm_dr_botfca.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- Yangilar F. 2015. Effects of Green Banana Flour on the Physical, Chemical and Sensory Properties of Ice Cream. *Food Technol Biotechnol*. 53(3):315–323. doi:10.17113/ftb.53.03.15.3851.
- Zhang Y, Han J. 2006. Mechanical and Thermal Characteristics of Pea Starch Films Plasticized with Monosaccharides and Polyols. *Journal of food science*. 71(2):109–118. doi:10.1111/j.1365-2621.2006.tb08891.

Anexos

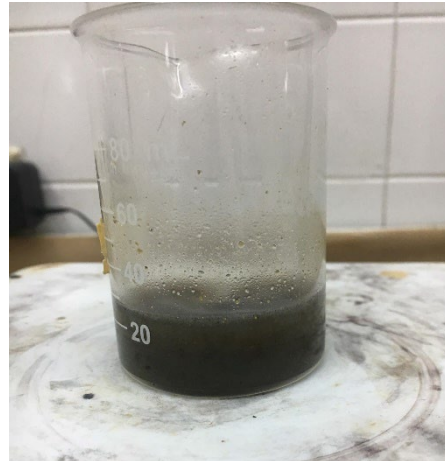
Anexo A

Pruebas preliminares realizadas.



Anexo B

Prueba cualitativa de almidón para harina de cáscara de plátano.



Anexo C

Pruebas microbiológicas indicadoras de presencia de bacterias y hongos en suelo.

