

**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**

Jorge Mario Muñoz Garrido

Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano
Honduras
Octubre, 2014

ZAMORANO
CARRERA DE AGROINDUSTRIA ALIMENTARIA

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

Proyecto especial de graduación presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero en Agroindustria Alimentaria en el Grado Académico de Licenciatura

Presentado por

Jorge Mario Muñoz Garrido

Zamorano, Honduras

Octubre, 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

Presentado por:

Jorge Mario Muñoz Garrido

Aprobado:

Luis Fernando Osorio, Ph.D.
Asesor Principal

Luis Fernando Osorio, Ph.D.
Director
Departamento de Agroindustria
Alimentaria

Juan Ruano, D.Sc.
Asesor

Raúl H. Zelaya, Ph.D.
Decano Académico

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

Jorge Mario Muñoz Garrido

Resumen: El empaque de un alimento es fundamental para la conservación y su protección. Sin embargo, una vez que el alimento es consumido, el empaque se desecha y pasa a formar parte de las más de 200, 000,000 t/año de desechos. Esto ha impulsado a la búsqueda de polímeros naturales los cuales pueden ser utilizados como empaques o recubrimientos, por su fácil degradación. El almidón ha sido empleado en los últimos años por su capacidad para formar películas, a pesar de que pueden actuar como barreras efectivas al transporte de gases (O_2 y CO_2), presentan elevada permeabilidad al vapor de agua. Por lo que esta investigación se realizó con el fin de elaborar un bioplástico combinando almidón de maíz, yuca y glicerol por el método casting, y evaluar su efecto en las propiedades físicas y de barrera. Se utilizó la metodología superficie respuesta definiendo como variables independientes la concentración de almidón de maíz respecto al almidón de yuca y porcentaje de glicerol. Las variables dependientes o respuesta: espesura, permeabilidad al vapor de agua, solubilidad en agua, diferencia de color, opacidad, perforación y elongación. Para las unidades experimentales se establecieron 4 puntos factoriales, 4 axiales y 5 repeticiones de un punto central para compararse contra una unidad control. Se obtuvieron seis modelos matemáticos lineal cuadrático, dos predictivos y cuatro de carácter tendencioso. En los cuales la variable glicerol tuvo mayor significancia, con efectos lineales sobre las variables respuestas. La concentración de almidones tuvo un efecto en la diferencia de color, opacidad y fuerza por perforación. Para poder optimizar todas las variables se determinó mediante la función de utilidad una combinación de 77.14 y 22.86 % de almidón de maíz y yuca respectivamente con un 46.24 % de glicerol (p/v).

Palabras clave: Biodegradable, empaque, metodología superficie respuesta

Abstract. Food packaging is fundamental for its conservation and protection. However, once the food has been consumed, the packaging is discarded and then turns into one more of the 200,000,000 t/year. This has prompted the search for natural polymers that can be utilized as packaging or covering because of their easy degradation. Starch has been employed in the last few years because of its capacity to form films, despite the fact that they can act as effective barriers to the transport of gases (O_2 and CO_2), they present an elevated permeability to water vapor. Hence why this investigation was conducted with the end of elaborating a bioplastic combining corn and yucca starch and glycerol by the casting method, and to evaluate its effect on its physical and barrier properties. The response surface methodology was used, defining as independent variables the corn starch concentration with respect to the yucca starch concentration and the percentage of glycerol. The dependent variables or response variables: thickness, water vapor permeability, water solubility, color difference, opacity, perforation and elongation.

For the experimental units, 4 factorial points, 4 axial points and 5 repetitions of a central point to be compared against a control unit were established. Six linear quadratic mathematical models were obtained, two predictive and four of tendentious nature. In which the glycerol variable had the most significance with linear effects over the response variables. The starch concentration had an effect on color difference, opacity and puncture resistance. To be able to optimize all variables it was determined through the desirability function a combination of 77.14 and 22.86% of corn starch and yucca starch respectively with a 46.24% of glycerol (p/v).

Key words: Biodegradable, desirability function, packaging, response surface methodology

CONTENIDO

Portadilla	i
Página de firmas	ii
Resumen	iii
Contenido	v
Índice de cuadros, figuras y anexos	vi
1 INTRODUCCIÓN	1
2 MATERIALES Y MÉTODOS.....	3
3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	10
4 CONCLUSIONES	36
5 RECOMENDACIONES	37
6 LITERATURA CITADA	38
7 ANEXOS.....	44

ÍNDICE DE CUADROS, FIGURAS Y ANEXOS

Cuadros	Página
1. Equipo utilizado para el bioplástico.....	3
2. Niveles codificados de las variables del experimento	5
3. Colección completa del diseño experimental	6
4. Efecto de la combinación de almidón de maíz y yuca, y glicerol en la espesura del día seis.....	10
5. Coeficientes de regresión y probabilidades (<i>P</i>) de un modelo de regresión polinomial aplicado en la espesura de un bioplástico.....	11
6. Efecto de la combinación de almidón de maíz y yuca, y glicerol en la Permeabilidad al vapor de agua.	13
7. Coeficientes de regresión y sus respectivas probabilidades (<i>p</i>) de un modelo de regresión cuadrático aplicado en la permeabilidad al vapor de agua para un Bioplástico.	14
8. Efecto de la combinación de almidón de maíz y yuca, y glicerol en la solubilidad en agua (25 ± 2 °C).	16
9. Coeficientes de regresión y sus respectivas probabilidades (<i>p</i>) de un modelo de regresión cuadrático aplicado en la solubilidad en agua para un Bioplástico.	17
10. Coeficientes de regresión y sus respectivas probabilidades (<i>p</i>) de un modelo de regresión cuadrático aplicado en el color de un Bioplástico	19
11. Efecto de la combinación de almidón de maíz y yuca, y glicerol en el color y la opacidad.	21
12. Efecto de la combinación de almidón de maíz y yuca, y glicerol en la opacidad de los tratamientos a través del tiempo.....	22
13. Efecto de la combinación de almidón de maíz y yuca, y glicerol en la fuerza de perforación de los tratamientos del día seis.	23
14. Coeficientes de regresión y sus respectivas probabilidades (<i>p</i>) de un modelo de regresión cuadrático aplicado en la fuerza de perforación de un Bioplástico	24
15. Efecto de la combinación de almidón de maíz y yuca, y glicerol en la deformación por perforación.	26
16. Coeficientes de regresión y sus respectivas probabilidades (<i>p</i>) de un modelo de regresión cuadrático aplicado en la deformación por perforación de un Bioplástico	27
17. Efecto de la combinación de almidón de maíz y yuca, y glicerol en la tensión de los tratamientos	29
18. Coeficientes de regresión y sus respectivas probabilidades (<i>p</i>) de un modelo de regresión cuadrático aplicado en la tensión de un Bioplástico	30
19. Efecto de la combinación de almidón de maíz y yuca, y glicerol en la deformación por elongación de los tratamientos a través del tiempo.....	32

20. Efecto de la combinación de almidón de maíz y yuca, y glicerol en el módulo de elasticidad.	33
21. Coeficientes de regresión y sus respectivas probabilidades (p) de un modelo de regresión cuadrático aplicado en la tensión de un Bioplástico	34
Figuras	Página
1. Representación del análisis de perforación (Adaptado)	9
2. Curva característica de la resistencia por tensión y Deformación.	9
3. Efecto del porcentaje de almidón de maíz y porcentaje de glicerol sobre la espesura (mm) de un bioplástico de almidón de maíz, yuca y glicerol.	12
4. Efecto del porcentaje de almidón de maíz y porcentaje de glicerol sobre la permeabilidad al vapor de agua (g.mm/h.m ² .kPa) de un bioplástico de almidón de maíz, yuca y glicerol.	15
5. Efecto del porcentaje de almidón de maíz y porcentaje de glicerol sobre la Solubilidad de un bioplástico de almidón de maíz, yuca y glicerol.	18
6. Efecto del porcentaje de almidón de maíz y porcentaje de glicerol sobre la diferencia de color (ΔE) de un bioplástico de almidón de maíz, yuca y glicerol.	20
7. Efecto del porcentaje de almidón de maíz y porcentaje de glicerol sobre la fuerza de perforación de un bioplástico de almidón combinado y glicerol.	25
8. Efecto del porcentaje de almidón de maíz y porcentaje de glicerol sobre la deformación por perforación de un bioplástico de almidón combinado y glicerol.	28
9. Efecto del porcentaje de almidón de maíz y porcentaje de glicerol sobre la tensión por elongación de un bioplástico de almidón de maíz, yuca, y glicerol.	31
10. Valores óptimos de las variables independientes sobre las propiedades físicas y de barrera de un bioplástico.	35
Anexos	Página
11. Cortes representativos de los tratamientos uno al nueve.	49
12. Cortes representativos de los tratamientos 10 al 14.....	50
22. Efecto de la combinación de almidón de maíz, yuca, y glicerol en la espesura de los tratamientos a través del tiempo.....	44
23. Efecto de la combinación de almidón de maíz, yuca, y glicerol en la permeabilidad al vapor de agua de los tratamientos a través del tiempo.....	45
24. Efecto de la combinación de almidón de maíz, yuca, y glicerol en solubilidad en agua (25 °C) de los tratamientos a través del tiempo..	45
25. Efecto de la combinación de almidón de maíz, yuca, y glicerol en la diferencia de color de los tratamientos a través del tiempo.	46
26. Efecto de la combinación de almidón de maíz, yuca, y glicerol en tensión de los tratamientos a través del tiempo.	46
27. Efecto de la combinación de almidón de maíz, yuca, y glicerol en el módulo de elasticidad de los tratamientos a través del tiempo.....	47
28. Efecto de la combinación de almidón de maíz, yuca, y glicerol en la fuerza por perforación de los tratamientos a través del tiempo.	47
29. Efecto de la combinación de almidón de maíz, yuca, y glicerol en el porcentaje de deformación de los tratamientos a través del tiempo.....	48

1. INTRODUCCIÓN

El empaque de un alimento es fundamental para la conservación y protección de los alimentos. Sin embargo, una vez que el alimento es consumido, el empaque se desecha y pasa a formar parte de las 200, 000,000 t/año de desechos producidas mundialmente (Villada *et al.* 2007). La mayor parte de los materiales usados son plásticos, los cuales provienen de una fuente no renovable y no son biodegradables (S.M.A 2008). Esto ha impulsado a la búsqueda de polímeros naturales los cuales pueden ser utilizados como empaques o recubrimientos, por su fácil degradación (Villada *et al.* 2007).

Dado el largo tiempo requerido para la biodegradación de los materiales sintéticos a base de derivados del petróleo, una alternativa con mejores perspectivas ecológicas lo representa el uso de empaques biodegradables y comestibles (Reyes 2013). Un polímero biodegradable es un compuesto de alto peso molecular que mediante la acción de microorganismos o enzimas, se degrada a compuesto de bajo peso molecular. Dentro de los polímeros naturales en vista por su alta disponibilidad y bajo costo, el almidón ha sido empleado en los últimos años como un aditivo para polímeros sintéticos (Ke y Sun 2001)

Los polisacáridos y las proteínas son conocidos por su capacidad para formar películas, a pesar de que pueden actuar como barreras efectivas al transporte de gases (O_2 y CO_2), presentan permeabilidad al vapor de agua elevada (Gontard y Guilbert 1992 y Donhowe y Fennema 1994). Cereda *et al.* (1992), informaron que el almidón gelatinizado tiene la propiedad de formar un gel que cuando se seca da lugar a películas transparentes. Esto se basa en el principio de gelatinización (altas temperaturas, con exceso de agua) con posterior retrogradación.

Películas biodegradables obtenidas a partir de almidón de yuca han sido desarrolladas con éxito (Veiga-Santos *et al.* 2007, Henrique *et al.* 2008; Grisi *et al.* 2008; Souza *et al.* 2011), mostrando una baja permeabilidad a gases, sin embargo su limitación es en las propiedades mecánicas y una alta permeabilidad al vapor de agua (Yu *et al.* 2006), y la diferencia con películas de almidón de maíz radica en su estructura cristalina (Van Soest *et al.* 1996).

De acuerdo con Banker *et al.* (1996), un plastificante es una sustancia no volátil, con un punto de ebullición alto, que adicionado a otro material altera sus propiedades físicas y mecánicas. Según Cuq *et al.* (1998), la adición de un plastificante a los biopolímeros modifica la organización tridimensional de su red. Disminuyendo sus fuerzas de interacción molecular, aumentando el volumen, dando mayor flexibilidad y extensibilidad. En tanto su aumento puede resultar en la reducción de sus propiedades

mecánicas y la reducción en las propiedades de barrera al vapor de agua (Coupland *et al.* 2000).

El método casting se basa en formar una solución con los componentes de las películas, en la que evapora el solvente a temperatura y humedad controladas para formar películas (Escobar *et al.* 2009). Es un método óptimo para escala de laboratorio, pero para escala industrial se utilizan procesos de extrusión, prensado y soplado. Fishman (2004), no encontraron diferencias en las características de las películas extruidas con películas hechas por el método casting.

En esta investigación se busca evaluar y caracterizar el efecto de las diferentes propiedades de dos almidones y el uso de un plastificante, sobre las propiedades físicas y de barrera de un bioplástico planteándose los siguientes objetivos:

- Elaborar un bioplástico con la combinación de almidón de maíz, yuca y glicerol, y evaluar su efecto en sus propiedades físicas y de barrera.
- Desarrollar la metodología superficie respuesta para la optimización de las variables en las propiedades físicas y de barrera del bioplástico.
- Determinar la combinación de almidón de maíz, yuca y glicerol que optimice las propiedades físicas y de barrera del bioplástico.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento fue realizado en el periodo del 24 de Julio al 02 de Octubre de 2014 en el laboratorio de Análisis de Alimentos de Zamorano (LAAZ), de la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Honduras.

Materia prima. Fueron utilizados almidón de yuca (AY) “*Manihot sculenta*” y almidón de Maíz (AM) “*Zea mays*” adquiridos en el supermercado “Más por menos” de la “Distribuidora del caribe”. La glicerina fue adquirida por la empresa “JG Scientific”. Ambos productos adquiridos en la ciudad de Tegucigalpa, Honduras.

Cuadro 1. Equipo utilizado para la elaboración del bioplástico.

Equipo	Marca/Modelo
Estufa agitador	Barnstead Thermolyne SP131325
Texturómetro	BROOKFIELD CT3 4500
Color	ColorFlex Hunterlab
Opacidad	Spectronic Genesys 5
Cámara de estabilidad	NORLAKE Scientific
Balanza analítica	OHAUS ADVENTURER

Elaboración de filmes. Se realizaron pruebas preliminares para determinar el flujo de proceso, cantidad de almidón (AY y AM), cantidad de glicerol (% peso/% volumen) y agua. Se utilizó el método de casting para la preparación de las soluciones filmogénicas (SF). Se mezcló dos tercios de agua y glicerol, con agitación magnética constante elevando la temperatura hasta 70 °C. Adicionalmente se agregó el resto de agua en una mezcla a temperatura ambiente con el almidón, para evitar la formación de grumos. La mezcla final se calentó hasta 70 ±1 °C durante 10 minutos. Posteriormente se enfrió la solución a 50 °C.

Secado y acondicionamiento de filmes. Después del enfriamiento se vertieron 0.25g SF/cm², en platos plásticos de 162 cm² de área. Para el secado se utilizó una cámara de estabilidad de vida anaquel a una temperatura de 40 °C (± 2 °C) durante 24 h. Después del secado se separaron los filmes manualmente de la placa y se almacenaron en un desecador a 25 °C con una humedad relativa controlada del 75% con una solución saturada de Cloruro de Sodio (NaCl) (Soto y Candelas s.f.) durante 12 días.

Diseño Experimental. Para evaluar el efecto combinado de almidón de maíz y yuca, con glicerol, sobre las propiedades mecánicas y de barrera del bioplástico, se realizó la metodología de superficie respuesta con una probabilidad de significancia del 10% (Box *et al.* 1978). Los parámetros del proceso fueron establecidos como variables independientes estudiados en tres niveles codificados como -1,0, 1, y se calcularon de acuerdo a la ecuación 1:

$$xi = \left(\frac{Xi \cdot Z}{\Delta xi} \right) \quad [1]$$

Dónde:

xi : Valor codificado de la variable xi

Xi : el valor real de la variable

Z : valor real de la variable en el punto central

Δxi : intervalo de la variable xi

Este modelo presenta dos niveles de variables axiales, que son codificadas como $+\alpha$ y $-\alpha$. El valor de α depende del número factorial ($F=2^k$) del diseño y del número de variables independientes ($K=2$), en el caso de este experimento se definió según la ecuación 2:

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

El número de tratamientos del experimento se basó en un diseño factorial completo en

$$n = 2^k + 2K + m \quad [3]$$

Dónde:

2^k = número de puntos factoriales

$2k$ = número de puntos axiales

m = número de repeticiones del punto central.

Así los tratamientos se distribuyeron de la siguiente manera:

$2^k = 2^2$ = 4 puntos factoriales

$2k = 2 \times 2$ = 4 puntos axiales

m = 5 replicados del punto central

13 unidades experimentales

Control = 1 unidad experimental

Total = 14 unidades experimentales

La amplitud en el rango de las variables se determinó en base a las pruebas preliminares así como en literatura consultada.

Para el análisis de los resultados experimentales, el método describe el comportamiento de un sistema en el que se combinan las variables independientes (X^k), la variable dependiente o la respuesta (Y_i). La respuesta fue en función de los niveles en los que estos factores fueron combinados. Definida por Box y Draper (1967) con la ecuación 4:

$$Y_i = F(X_1, X_2, \dots, X_k) \quad [4]$$

Cada respuesta se ajusta a través de un análisis de regresión ajustada con un polinomio cuadrático como las variables (XK) para cada respuesta (Y). El término general que se utiliza para predecir el comportamiento de cada respuesta se describe con la ecuación 5:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 + \beta_{12} X_1 X_2 + \varepsilon \quad [5]$$

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;

$\beta_{12}, \beta_{13}, \beta_{23}$ = coeficientes de interacción entre las variables independientes;

ε = error experimental

En el cuadro 2 se presenta los niveles codificados (-1, 0, +1) y los valores axiales ($-\alpha$ y $+\alpha$).

Cuadro 2. Niveles codificados de las variables del experimento

Variables independientes	Niveles				
	$-\alpha$	-1	0	1	$+\alpha$
% Almidón maíz	14.7	25.0	50.0	75.0	85.4
% Glicerol	35.9	40.0	50.0	60.0	64.1

Fuente: Box *et al.* (1972)

En el cuadro 3 se encuentran los niveles codificados y valores reales de los 14 tratamientos que se probaron.

Cuadro 3. Colección completa del diseño experimental

Tratamientos	Niveles reales de Variables				
	Almidón Maíz	% Glicerol	Almidón Maíz	Almidón Yuca	% Glicerol
1	1.0	1.0	75.0	25.0	60.0
2	1.0	-1.0	75.0	25.0	40.0
3	-1.0	1.0	25.0	75.0	60.0
4	-1.0	-1.0	25.0	75.0	40.0
5	-1.4	0.0	14.6	85.4	50.0
6	1.4	0.0	85.4	14.6	50.0
7	0.0	-1.4	50.0	50.0	35.9
8	0.0	1.4	50.0	50.0	64.1
9 ^(c)	0.0	0.0	50.0	50.0	50.0
10 ^(c)	0.0	0.0	50.0	50.0	50.0
11 ^(c)	0.0	0.0	50.0	50.0	50.0
12 ^(c)	0.0	0.0	50.0	50.0	50.0
13 ^(c)	0.0	0.0	50.0	50.0	50.0
14 ^(Control)	-	-	-	100.0	50.0

(c): Punto central del experimento

Análisis estadístico. Se realizó con una separación de medias Tukey y se realizó un análisis de varianza ANDEVA con un nivel de probabilidad del 5%, utilizando el programa SAS® versión 9.3 (Statistical Analysis System).

Para analizar los datos se utilizó el programa Statistica versión 7.0, se utilizó las variables independientes codificadas para la obtención de los coeficientes de regresión y los valores reales para la elaboración de gráficos superficie respuesta. También se determinó los puntos óptimos de las variables independientes para la optimización de todas las variables dependientes.

Se realizó un análisis test F al 10% de significancia, el modelo de regresión fue significativo cuando el valor del test F calculado fue mayor o igual al F de la tabla de puntos de distribución con lo cual se pudo trazar la superficie.

Caracterización del Bioplástico

Espesura. La espesura de los filmes fue determinada utilizando un micrómetro manual (± 0.01 mm de error) marca Startter. La espesura final se determinó de manera aleatoria con 10 puntos (CAO *et al.* 2007).

Permeabilidad al vapor de agua. Se determinó gravimétricamente a 25 °C de acuerdo con el método E96-80 descrito por la norma ASTM (American Society for Testing and Materials) modificado según Gontard (1991) y Vicentini (2003). Las películas se cortaron en forma circular con un diámetro de 30 mm aplicados en vasos volumétricos adaptados, con agua destilada. Los vasos se colocaron en desecadores con silica, almacenados a 25 °C. El peso del vaso se determinó cada 24 h durante 9 días a través de una balanza analítica. El flujo de permeabilidad al vapor de agua (Fva) se calculó según la ecuación 6:

$$Fva = g/tA \quad [6]$$

Donde A es el área de permeabilidad, g es la pérdida de peso y t el tiempo total en horas. Posteriormente, la permeabilidad al vapor de agua (PVA) se calculó a partir de la ecuación 7:

$$Pva = (g/tA) \times (X/\Delta P) \quad [7]$$

Dónde X es la media del espesor del bioplástico y ΔP la diferencia de presión de vapor del medio ambiente que contiene el desecador (0 kPa, 25 °C) y el agua pura (3167 kPa a 25°C)

Solubilidad en agua. La solubilidad en agua del bioplástico se determinó de acuerdo con la metodología propuesta por Gontard *et al.* (1992) con adaptación. Los filmes se cortaron en forma circular con un diámetro de 20 mm y fueron pesados, luego sumergidos en beakers con 50 mL de agua destilada. Se agitaron lentamente durante 24 h a 25°C. Después se retiraron las muestras y se secaron ($105 \pm 2^\circ\text{C}$ durante 24 h) en una estufa para determinar el peso del material que fue solubilizado. La solubilidad se expresa de acuerdo con la ecuación 8:

$$\% \text{ Solubilidad} = (1 - (PI - PF/PI)) * 100 \quad [8]$$

Dónde PI es el peso inicial del bioplástico y PF es el peso final del material seco que no se solubilizo.

Color. Para la evaluación del color se utilizó Colorflex Hunterlab® evaluando los valores L*, a* y b*. Dónde:

L = luminosidad (0 = negro y 100 = blanco)
a (-80 a cero = verde, rojo = cero a 100)
b (azul = -100 a cero, de cero a 70 = amarillo)

$$\Delta E(\text{diferencia total de color}) = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2} \quad [9]$$

Se realizaron tres repeticiones para cada muestra en placa de vidrio de 50 mm de diámetro.

Medida de Opacidad. La opacidad aparente se determinó con la ayuda de un espectrofotómetro, y el aire usado como referencia. Bajo estas condiciones, la banda de longitud de onda de barrido de luz visible fue de 500 nm para cada película y la opacidad de la película se calculó según la ecuación 10:

$$\text{Opacidad} = \frac{A_{500}}{T} \quad [10]$$

Donde A_{500} es la absorbancia a 500 nm y T es el espesor de la película (mm) (Cho y Rhee 2004; Shiku *et al.* 2004). El análisis se realizó por triplicado.

Propiedades Mecánicas. Las propiedades mecánicas de interés fueron perforación y elongación. Ambas pruebas se realizaron en un Analizador de Textura CT3 4500. Se realizaron 10 pruebas a cada muestra.

Perforación. La fuerza y distancia a la rotura se determinaron en las pruebas de perforación de acuerdo con la metodología establecida por literatura (Gontard 1991; Vicentini 2003; Rocha 2009) con adaptaciones. Las muestras con un tamaño de 40 mm de longitud y 15 mm de ancho eran colocadas en un vaso gravimétrico y atravesado por una sonda de 0.3 cm de diámetro, moviéndose a una velocidad de 0.1cm/s (Figura 1). La deformación se calculó en base al desplazamiento de la sonda hasta la rotura y la distancia media de la película según la ecuación 11:

$$\text{Deformación } (h) = \left(\frac{\sqrt{(b^2 + a^2)}}{40} \right) \times 100 \quad [11]$$

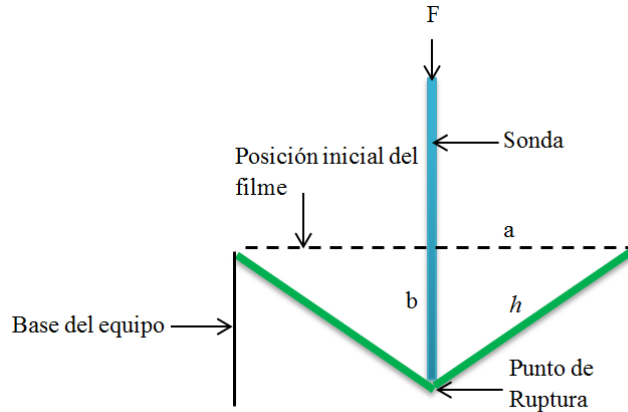


Figura 1. Representación del análisis de perforación (Adaptado)

Elongación. Mediante el test de elongación podemos derivar tres propiedades: Tensión, Deformación y módulo de elasticidad (Vicentini 2003). Las propiedades expresan la resistencia de un material a la elongación y a la ruptura, cuando se somete a tensión, el módulo de elasticidad indica cuan rígido es un material (Oliveira *et al.* 1996). El alargamiento a la rotura y módulo de elasticidad se determinó basado en el método D 828-95a de la ASTM 1995. Las películas se cortaron en piezas de 15 mm de ancho y 40 mm de largo. La distancia inicial (LO) entre las mordazas fue de 30 mm y la velocidad de tracción de 0.9 mm/s. La tensión de rotura se calculó mediante la relación entre la fuerza y el área de la sección transversal inicial de la película, y la deformación a la rotura considerado como la deformación lineal $[(l - l_0) / l_0]$, se determinó por la curva de tensión-deformación. El módulo de elasticidad se calculó como la pendiente de la región lineal de la curva de tensión en función a la deformación.

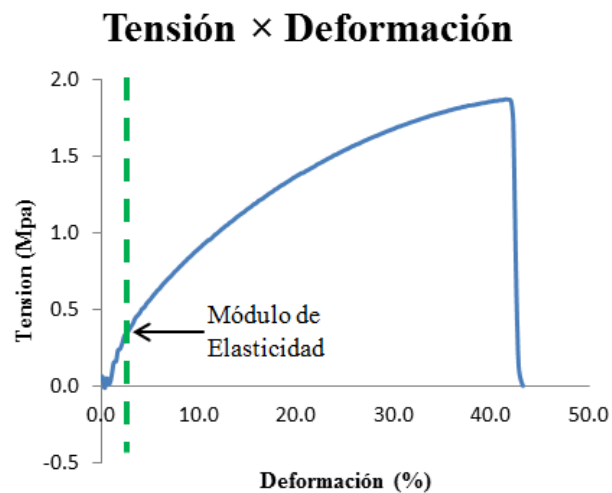


Figura 2. Curva característica de la resistencia por tensión y Deformación.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Espesura. Se define como espesura la distancia perpendicular entre dos superficies, el material que formará la matriz es un parámetro importante para la elaboración de películas plásticas. Conociendo el espesor es posible obtener información sobre las propiedades mecánicas y de barrera (Oliveira *et al.* 1996). La matriz se crea con la expansión del almidón gelatinizado formando una matriz amilácea de alto volumen y alta viscosidad. El cuadro 7 indica los diferentes niveles de espesura por tratamiento (combinación) durante el día seis. En la sección de Anexos muestra la variación de espesura a través del tiempo de todos los experimentos.

Estadísticamente se encontraron diferencias y similitudes entre los tratamientos, con un rango de 0.25 hasta 0.42 mm de grosor (Cuadro 4). El tratamiento con mayor espesura fue el ocho. El tratamiento ocho posee 64.14 % de glicerol y una proporción 50:50 de almidón de maíz y yuca. Este tratamiento es un punto axial (“+ α ”) positivo de la variable glicerol, que expresa el mayor porcentaje de glicerol del experimento. Por el contrario el tratamiento siete presenta la menor espesura. El tratamiento siete posee un 35.86 % de glicerol, y una combinación 50:50 de almidón, lo que le atribuimos al tener la menor cantidad de glicerol dentro del experimento (“- α ”). Para comprobar el efecto del glicerol en la espesura se muestran en el cuadro 5 los resultados del análisis estadístico.

Cuadro 4. Efecto de la combinación de almidón de maíz y yuca, y glicerol en la espesura del día seis.

Tratamiento	Almidón	Almidón	Glicerol	Espesura
	Maíz	Yuca		
	%	%	%	mm (\pm D.E) [¥]
1	75.00	25.00	60.00	0.33 \pm 0.02 ^{BCD}
2	75.00	25.00	40.00	0.30 \pm 0.03 ^{ECD}
3	25.00	75.00	60.00	0.35 \pm 0.08 ^{BC}
4	25.00	75.00	40.00	0.26 \pm 0.02 ^E
5	14.65	85.35	50.00	0.33 \pm 0.03 ^{BCD}
6	85.35	14.65	50.00	0.38 \pm 0.02 ^{BA}
7	50.00	50.00	35.86	0.25 \pm 0.04 ^E
8	50.00	50.00	64.14	0.42 \pm 0.04 ^A
9	50.00	50.00	50.00	0.27 \pm 0.02 ^E
10	50.00	50.00	50.00	0.34 \pm 0.03 ^{BCD}
11	50.00	50.00	50.00	0.29 \pm 0.04 ^{ED}
12	50.00	50.00	50.00	0.28 \pm 0.05 ^{ED}
13	50.00	50.00	50.00	0.35 \pm 0.02 ^{BC}
14	0.00	100.00	50.00	0.25 \pm 0.04 ^E

Valor seguido por una letra mayúscula (columna) son estadísticamente diferentes P<0.05

¥: Media \pm Desviación estándar.

Se encontró que el % Glicerol fue la única variable significativa ($P < 0.05$), indicando un aumento en la espesura por cada unidad agregada de glicerol. El coeficiente de determinación (R^2) indica que un 66% de los datos se ajusta al modelo (ecuación 12) y el 44 % restante no se ajusta debido al error experimental. La falta de ajuste no fue significativa ($P < 0.1$) lo que indica que no hace falta un ajuste de los datos al modelo. Por lo que el modelo elegido representa de manera tendenciosa el comportamiento de la espesura (Thompson 1982).

Cuadro 5. Coeficientes de regresión y probabilidades (P) de un modelo de regresión polinomial aplicado en la espesura de un bioplástico.

Coeficientes	Espesura
Intercepto	3.06E-01***
X ₁	1.14E-02 n.s
X ₁ ²	1.57E-02 n.s
X ₂	4.52E-02**
X ₂ ²	5.52E-03 n.s
X ₁ X ₂	-1.50E-02 n.s
R ²	0.66
Falta de Ajuste	4.71E-03n.s

X₁: Almidón de Maíz (%); X₂: Glicerol (%)

n.s =No significativo

*= Significativo a un nivel del 10% de probabilidad

**= Significativo a un nivel del 5% de probabilidad

***= Significativo a un nivel del 1% de probabilidad

De acuerdo a las variables independientes significativas se determinó el siguiente modelo:

$$Espesura = 0.306 + 0.044.78X_2 \quad [12]$$

En base en este modelo fueron construidos gráficos de superficie respuesta para espesura (figura 3). Se encuentra el efecto lineal que tiene el glicerol sobre la espesura del bioplástico. Resultado similar encontrado por Rocha (2009), en películas biodegradables de un combinando almidón de yuca, extracto proteico de soya y diferentes niveles de pH.

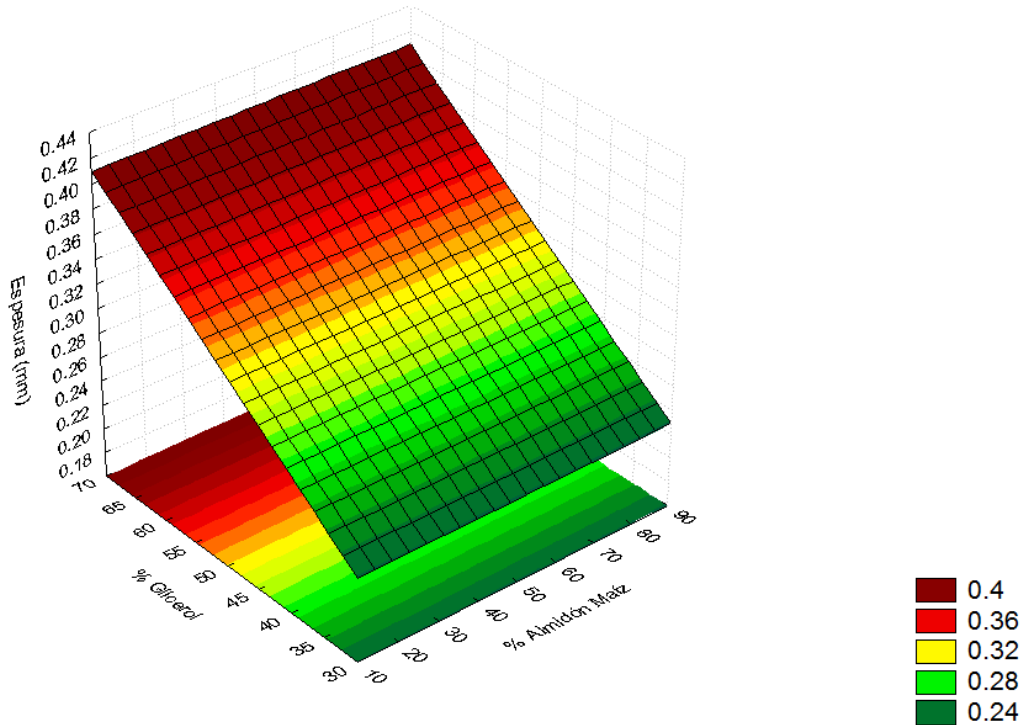


Figura 3. Efecto del porcentaje de almidón de maíz y porcentaje de glicerol sobre la espesura (mm) de un bioplástico de almidón de maíz, yuca y glicerol.

Shimazu *et al.* (2007), encontraron efecto similar del glicerol sobre la espesura en películas de almidón de yuca. El modelo (ecuación 12) indica un incremento de 0.044 mm en la espesura por cada unidad agregada de glicerol. Esto ocurre solo si se colocó la misma cantidad de solución filmogénica en las placas para formar los filmes, aún con una diferente formulación. Los filmes con mayor porcentaje de plastificante, aportara mayor porcentaje de solidos totales, y cuando se sequen y darán mayor espesura (Rocha 2009). Sin embargo un mayor porcentaje de glicerol repercute en la dificultad de manejo, haciendo que se rompieran fácilmente, efecto también visto por Mali *et al.* (2004).

Chang *et al.* (2006), elaboraron filmes de almidón de yuca con glicerol por el método casting, obtuvieron espesuras de 0.035 hasta 0.05 mm, sin embargo el estudio no especifica el aumento de la espesura de cada muestra con el incremento de glicerol. Phan *et al.* (2008), elaboraron filmes de almidón de yuca con tres tipos de plastificantes (ácido esteárico, urea y sacarosa) por el método de extrusión termoplástica. La variación fue de 0.4 a 0.8 mm, y el uso de un plastificante con concentraciones del 2 al 10% elevo la espesura de los filmes, independientemente del tipo de plastificante.

Permeabilidad al vapor de agua. Según “Annual Book of Standars” (ASTM E96-80) define la permeabilidad al vapor de agua (Pva) como la tasa de transmisión de vapor de agua por unidad de área de un material, de espesura conocida, que es inducida por una diferencia de presión entre dos superficies específicas, con condiciones de temperatura y humedad relativa específicas (ASTM 1989). Se considera que el proceso de permeabilidad de gases y vapores a través de los espacios intermoleculares de un material tiene lugar en 3 etapas: a) la sorción y la solubilidad del líquido en la superficie del material; b) difusión de permear a través del material debido a la acción de un gradiente de concentración; c) la desorción y la evaporación del líquido en el otro lado del material (Sarantopoulos *et al.*2002).

El cuadro 6 indica los diferentes niveles de Pva a partir del día 6. Se encontró una variación en las medias desde 1.22 hasta 5.02 (g.mm/h.m².kPa). El tratamiento ocho presento la mayor diferencia estadística, atribuyéndole una mayor permeabilidad. El tratamiento ocho posee un 64.14 % de glicerol y una combinación de almidones de 50:50. Por el otro lado los tratamientos dos, cuatro, cinco, nueve, once, doce, trece y catorce fueron estadísticamente iguales al tener la menor diferencia estadística, lo que significa “menor permeabilidad”. Cabe recalcar que los tratamientos ocho y siete son puntos axiales de la variable glicerol.

Cuadro 6. Efecto de la combinación de almidón de maíz y yuca, y glicerol en la Permeabilidad al vapor de agua.

Tratamiento	Almidón	Almidón	Glicerol	Permeabilidad
	Maíz	Yuca		al vapor de agua
	%	%	%	g.mm/h.m ² .kPa(± D.E) †
1	75.00	25.00	60.00	3.94±0.08 ^{BC}
2	75.00	25.00	40.00	1.92±0.02 ^D
3	25.00	75.00	60.00	4.24±0.22 ^{BA}
4	25.00	75.00	40.00	1.41±0.19 ^D
5	14.65	85.35	50.00	1.72±0.07 ^D
6	85.35	14.65	50.00	4.57±0.05 ^{BA}
7	50.00	50.00	35.86	1.26±0.04 ^D
8	50.00	50.00	64.14	5.02±0.09 ^A
9	50.00	50.00	50.00	1.31±0.03 ^D
10	50.00	50.00	50.00	3.31±0.78 ^C
11	50.00	50.00	50.00	1.43±0.10 ^D
12	50.00	50.00	50.00	1.37±0.02 ^D
13	50.00	50.00	50.00	1.83±0.03 ^D
14	0.00	100.00	50.00	1.22±0.01 ^D

Valor seguido por una letra mayúscula (columna) son estadísticamente diferentes P<0.05

†: Media ± Desviación estándar.

Según Bertuzzi *et al.* (2007), el transporte de agua en películas comestibles de productos a base de almidón sucede un fenómeno complejo debido a la interacción de la estructura del almidón (OH) con las moléculas de agua (H₂O) la permeabilidad es afectada generalmente por temperatura, espesura de la película, y el uso de un plastificante. El uso de un plastificante favorece a la permeabilidad del vapor de agua debido a su naturaleza hidrofílica, lo que favorecerá a las interacciones inter moleculares de los materiales.

De acuerdo a los resultados estadísticos del cuadro 7 la variable glicerol lineal (X₂) es significativa estadísticamente ($P < 0.05$). El coeficiente múltiple de determinación (R²) indico que el 78% de la variación en los datos se ajusta al modelo elegido y el otro 22 % se debe al error experimental. La falta de ajuste no fue significativa, por lo que el modelo representa de manera adecuada una tendencia el modelo sobre la permeabilidad al vapor de agua (Thompson 1982).

Cuadro 7. Coeficientes de regresión y sus respectivas probabilidades (p) de un modelo de regresión cuadrático aplicado en la permeabilidad al vapor de agua para un Bioplástico.

Coeficientes	Pva
Intercepto	1.85E+00***
X ₁	5.30E-01 n.s
X ₁ ²	5.85E-01 n.s
X ₂	1.28E+00 **
X ₂ ²	5.83E-01n.s
X ₁ X ₂	-2.03E-01 n.s
R ²	0.78
Falta de Ajuste	2.04 n.s

X₁: Almidón de Maíz (%); X₂: Glicerol (%)

n.s =No significativo

*= Significativo a un nivel del 10% de probabilidad

**= Significativo a un nivel del 5% de probabilidad

***= Significativo a un nivel del 1% de probabilidad

En base a los resultados del cuadro 7 se construyó la ecuación matemática que predice el comportamiento de las variables sobre la permeabilidad al vapor de agua:

$$Pva \text{ (g. mm/h. m}^2 \cdot \text{kPa)} = 1.85 + 1.28X_2 \quad [13]$$

En base al modelo (ecuación 13), se elaboró un gráfico de superficie respuesta (Figura 4) que representa la relación entre las variables con la permeabilidad.

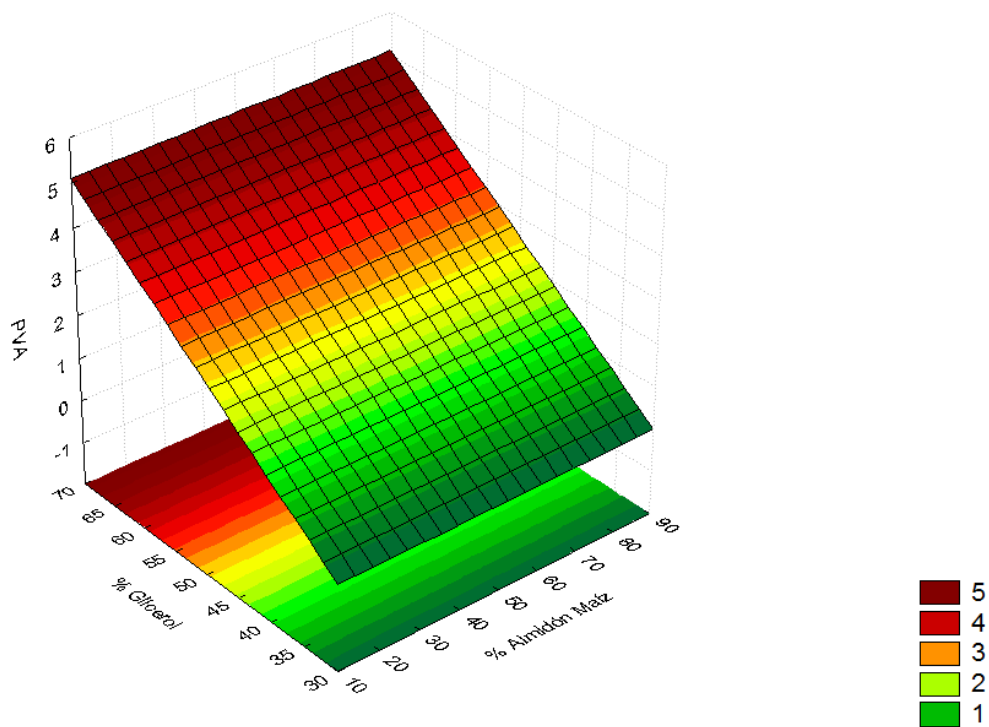


Figura 4. Efecto del porcentaje de almidón de maíz y porcentaje de glicerol sobre la permeabilidad al vapor de agua ($\text{g}\cdot\text{mm}/\text{h}\cdot\text{m}^2\cdot\text{kPa}$) de un bioplástico de almidón de maíz, yuca y glicerol.

Se describe un aumento del flujo de $1.28 \text{ g}\cdot\text{mm}/\text{h}\cdot\text{m}^2\cdot\text{kPa}$ por unidad adicional de glicerol. Sobral y Ocuno (2000), encontraron también el efecto del aumento en la permeabilidad al vapor de agua con la adición de glicerol. Mali *et al.* (2004), atribuye este efecto a la interacción molecular del glicerol con la red de almidón, tornándose menos densa por sus características hidrofílicas, favoreciendo la adsorción de las moléculas de agua. La variación de la permeabilidad en los experimentos vario desde 1.22 a 3.22 ($\text{g}\cdot\text{mm}/\text{h}\cdot\text{m}^2\cdot\text{kPa}$). Robertson (1993), citó para polímeros sintéticos como PVC (Policloruro de vinilo), HDPE (Polietileno de alta densidad), y LDPE (Polietileno de baja densidad) los valores de permeabilidad al vapor de agua son de: 0.029, 0.005 y 0.001 ($\text{g}\cdot\text{mm}/\text{h}\cdot\text{m}^2\cdot\text{kPa}$). Lo que representa una alta diferencia entre ambos polímeros para aplicaciones donde la barrera deba ser de un bajo nivel para que retarde la tasa de intercambio de humedad del producto con el ambiente y viceversa (Gontard *et al.* 1992).

Solubilidad en agua. Se define como la propiedad de formar una solución una sustancia con otra. Se define también como la medida de capacidad que tiene una determinada sustancia de disolverse en otra, expresado como la proporción de disolución de la primera sustancia en la segunda (Ferreira 1986). Según Shih (1996), normalmente los polisacáridos son altamente higroscópicos y se desintegran rápidamente en agua.

En el cuadro 8 se muestran los resultados del porcentaje de material soluble en agua, con una variación desde 39.03 hasta 55.29 % de material soluble. En la sección de anexos se encuentra los resultados a través del tiempo de los diferentes experimentos. Según los resultados los tratamientos dos (75 % Maíz, 25 % Yuca y 40 % Glicerol) y siete (50 % Maíz, 50% y 35.86 % glicerol) tuvieron la media más alta. Entre estos dos tratamientos hay diferencias entre las combinaciones de almidón y glicerol, por lo que por medio de la separación de medias es difícil encontrar cuál de las dos variables tuvo mayor efecto sobre la solubilidad en agua. Por el otro lado una repetición del punto central presento la menor solubilidad. Por lo que se realizó un análisis estadístico que encuentre cuál de las variables fue significantes y si existe relación entre ellas sobre la permeabilidad (Cuadro 9).

Cuadro 8. Efecto de la combinación de almidón de maíz y yuca, y glicerol en la solubilidad en agua (25 ± 2 °C).

Tratamiento	Almidón	Almidón	Glicerol	Solubilidad
	Maíz	Yuca		en agua
	%	%	%	% (\pm D.E) [¥]
1	75.00	25.00	60.00	43.06 \pm 0.88 ^{BA}
2	75.00	25.00	40.00	57.04 \pm 2.76 ^A
3	25.00	75.00	60.00	44.57 \pm 0.08 ^{BA}
4	25.00	75.00	40.00	53.56 \pm 1.24 ^{BA}
5	14.65	85.35	50.00	48.40 \pm 1.02 ^{BA}
6	85.35	14.65	50.00	50.40 \pm 10.16 ^{BA}
7	50.00	50.00	35.86	55.29 \pm 1.37 ^A
8	50.00	50.00	64.14	44.67 \pm 1.42 ^{BA}
9	50.00	50.00	50.00	50.06 \pm 2.46 ^{BA}
10	50.00	50.00	50.00	39.03 \pm 14.73 ^B
11	50.00	50.00	50.00	50.56 \pm 2.91 ^{BA}
12	50.00	50.00	50.00	52.18 \pm 1.17 ^{BA}
13	50.00	50.00	50.00	50.06 \pm 1.75 ^{BA}
14	0.00	100.00	50.00	53.06 \pm 0.69 ^{BA}

Valor seguido por una letra mayúscula (columna) son estadísticamente diferentes $P < 0.05$

¥: Media \pm Desviación estándar.

El nivel lineal de la variable glicerol (X_2) fue la única variable significativa ($P < 0.1$) sobre la solubilidad del bioplástico con la diferencia que tiene un signo negativo, que indica una disminución en la solubilidad por efecto de la adición de glicerol. El R^2 representa que el 60% de la variación de los datos se adaptará al modelo, lo que indica ser un modelo tendencioso, no predictivo (Thompson 1982). Complementado por la no significancia de la falta de ajuste.

Cuadro 9. Coeficientes de regresión y sus respectivas probabilidades (p) de un modelo de regresión cuadrático aplicado en la solubilidad en agua para un Bioplástico.

Coefficientes	Solubilidad
Intercepto	4.83E+01 ***
X_1	1.23E-01 n.s
X_1^2	1.07E+00 n.s
X_2	-4.78E+00 *
X_2^2	6.22E-01 n.s
$X_1 X_2$	-1.25E+00 n.s
R^2	0.60
Falta de Ajuste	19.08 n.s

X_1 : Almidón de Maíz (%); X_2 : Glicerol (%)

n.s = No significativo

*= Significativo a un nivel del 10% de probabilidad

**= Significativo a un nivel del 5% de probabilidad

***= Significativo a un nivel del 1% de probabilidad

En base a la variable independiente se construyó un modelo con su coeficiente de regresión:

$$\text{Solubilidad (\%)} = 48.3 - 4.78X_2 \quad [14]$$

En base al modelo (ecuación 14) se creó un gráfico de superficie respuesta (Figura 5). Se muestra un cambio en la solubilidad sobre el aumento o disminución del glicerol, y es independiente el efecto sobre la permeabilidad la adición de almidón de maíz (Cuadro 9). A medida que aumenta el nivel de glicerol, disminuye la Solubilidad en agua, efecto similar visto por Gontard *et al.* (1992).

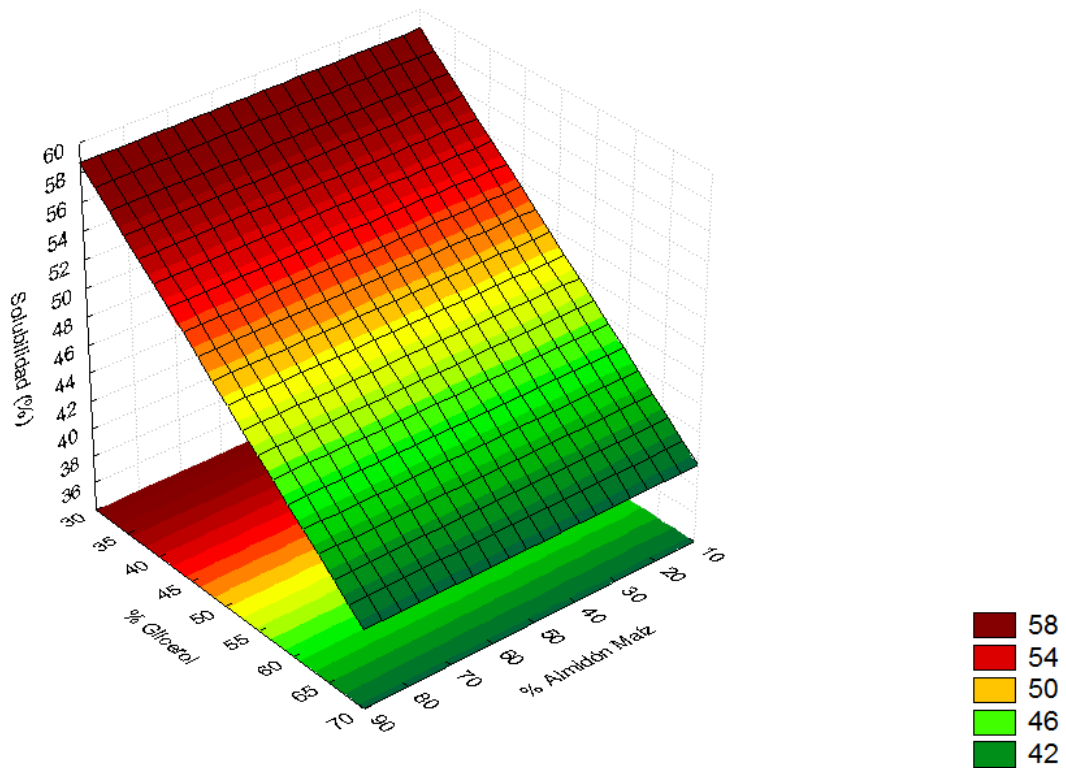


Figura 5. Efecto del porcentaje de almidón de maíz y porcentaje de glicerol sobre la Solubilidad de un bioplástico de almidón de maíz, yuca y glicerol.

Rocha (2009), encontró negativo el efecto cuadrático del glicerol, encontrando un punto mínimo de solubilidad por la adición de glicerol, sin embargo ella tuvo la interacción de proteína de soya y el efecto del pH sobre la solubilidad de sus películas. Efecto similar al de Bourtoom *et al.* (2006), encontraron una mayor solubilidad a pH alto, en películas de almidón y proteínas.

Tomando en cuenta que la espesura es un factor que determina el grado de solubilidad, esta fue similar a otro estudio bajo el mismo método de casting con una variación de 14.84 hasta 60.96 % (Gontard *et al.* 1992). Los resultados de solubilidad fueron menores que los valores de solubilidad en la adición de propionato de calcio y permanganato de potasio en películas de almidón de yuca, con solubilidad variando de 78 a 86 % (Yamashita *et al.* 2005). La alta solubilidad del bioplástico puede ser una alternativa para la aplicación de productos que necesitan de una hidratación previa a su consumo, o incluso en el recubrimiento de semillas que necesitan de una rápida germinación, como portadores de aditivos necesarios para el crecimiento de las mismas (Batista *et al.* 2005).

Propiedades ópticas

Color Los resultados de los experimentos de análisis de diferencia de color (ΔE) a través del tiempo se encuentran en Anexos. Se pudo observar un rango en las medias de la diferencias de color (ΔE) del día seis de 29.54 hasta 47.64 (Cuadro 11).

El tratamiento tres (25 % almidón de maíz, 75 % de Almidón de yuca y 60 % glicerol) presento la mayor diferencia, diferente al tratamiento uno (75 % maíz, 25 % yuca y 60 % glicerol). Lo que diferencio un tratamiento de otro fue la proporción de almidón de maíz y yuca, dando mayor diferencia cuando predomina la yuca y es menor cuando predomina el maíz, el glicerol es el mismo en ambas formulaciones. Por lo que se realizó un análisis estadístico sobre cuál de las variables fue significativa en la diferencia del color (cuadro 10).

Cuadro 10. Coeficientes de regresión y sus respectivas probabilidades (p) de un modelo de regresión cuadrático aplicado en el color de un Bioplástico

Coeficientes	ΔE
Intercepto	3.81E+01 ***
X_1	-3.35E+00 **
X_1^2	-1.64E+00 n.s
X_2	1.28E+00 n.s
X_2^2	9.91E-01 n.s
$X_1 X_2$	-2.37E+00 n.s
R^2	0.52
Falta de Ajuste	95.39 n.s

X_1 : Almidón de Maíz (%); X_2 : Glicerol (%)

n.s =No significativo

*= Significativo a un nivel del 10% de probabilidad

**= Significativo a un nivel del 5% de probabilidad

***= Significativo a un nivel del 1% de probabilidad

Según el cuadro 10 resulto significativa ($P < 0.05$) la variable almidón de maíz en su nivel lineal. Pero indica un efecto negativo del aumento de la cantidad de almidón de maíz sobre el almidón de yuca en la disminución de la diferencia de color. Sin embargo solo el 52 % de la variación de los datos se ajustara al modelo, lo que se le atribuye un porcentaje muy alto al error experimental. Aunque la falta de ajuste no fue significativa pueden los datos ajustarse al modelo de carácter tendencioso:

$$\Delta E = 38.1 - 3.35X_1 \quad [15]$$

En base a la ecuación 15 se construyó un gráfico de superficie respuesta (Figura 6) donde la región que presenta una menor diferencia de color a medida que aumentamos la cantidad de almidón de maíz respecto al de yuca.

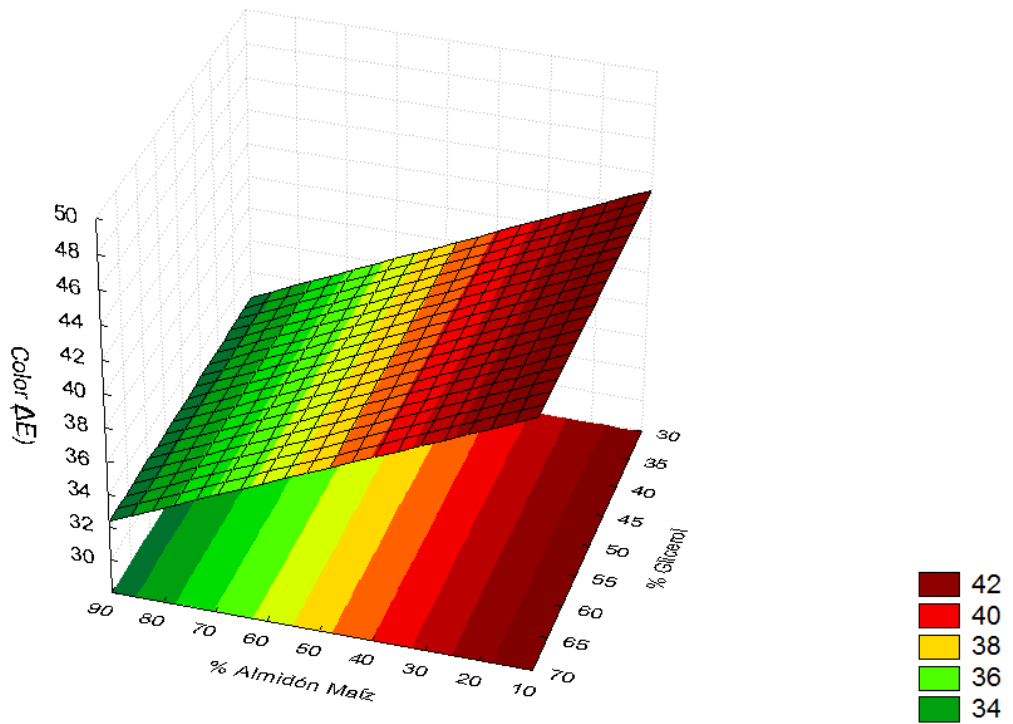
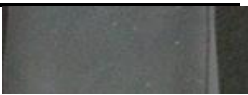







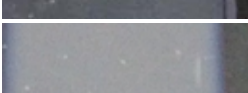

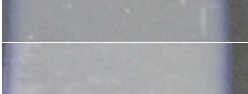
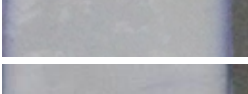




Figura 6. Efecto del porcentaje de almidón de maíz y porcentaje de glicerol sobre la diferencia de color (ΔE) de un bioplástico de almidón de maíz, yuca y glicerol.

Cuando se seca una solución de almidón dan origen a películas transparentes. Cuando sucede una reducción del almidón y aumenta otro compuesto cambia significativamente el color, tal como lo explica Rocha (2009), en la adición de un extracto de proteína de soya a la matriz de las películas biodegradables. García y Sobral (2005), observaron que la diferencia de color entre los filmes de proteínas musculares fue afectada por la cantidad de proteína agregada a la solución filmogénica. En otro trabajo Sobral *et al.* (2004), elaboraron filmes constituidos de proteínas miofibrilares y sarcoplasmáticas de musculo de tilapia encontrando diferencias entre agregar 2 g y 1 g de proteína.

Cuadro 11. Efecto de la combinación de almidón de maíz y yuca, y glicerol en el color y la opacidad.

Tratamiento	Almidón Maíz	Almidón Yuca	Glicerol	Color	Opacidad	Representación Grafica
	%	%	%	$\Delta E (\pm D.E)_{\text{¥}}$	$(\pm D.E)_{\text{¥}}$	
1	75.00	25.00	60.00	29.54±0.78 _E	2.97±0.10 _F ^E	
2	75.00	25.00	40.00	30.64±1.8 ^D _E	3.32±0.23 ^E _{DF}	
3	25.00	75.00	60.00	47.64±1.62 _A	5.31±0.04 ^C _B	
4	25.00	75.00	40.00	39.26±1.05 _{BC}	5.18±0.08 ^C _B	
5	14.65	85.35	50.00	35.50±2.14 _C	3.88±0.22 ^D	
6	85.35	14.65	50.00	35.61±1.94 _C	2.57±0.27 ^F	
7	50.00	50.00	35.86	39.69±0.81 _{BC}	5.54±0.06 ^C _B	
8	50.00	50.00	64.14	41.72±3.18 _B	3.27±0.42 ^E _{DF}	
9	50.00	50.00	50.00	35.95±1.31 _C	4.80±0.15 ^C	
10	50.00	50.00	50.00	36.36±0.20 _C	3.72±0.18 ^E _D	
11	50.00	50.00	50.00	43.28±1.28 _{BA}	5.31±0.22 ^C _B	
12	50.00	50.00	50.00	39.50±1.02 _{BC}	5.60±0.10 ^B	
13	50.00	50.00	50.00	35.27±1.85 _{DC}	3.18±0.47 ^E _{DF}	
14	0.00	100.00	50.00	42.31±1.39 _B	6.58±0.51 ^A	

Valor seguido por una letra mayúscula (columna) son estadísticamente diferentes $P < 0.05$

¥: Media ± Desviación estándar.

Opacidad. En el cuadro 12 se muestran las medias de los tratamientos y sus desviaciones estándar con una variación de 2.36 hasta 7.37. En el día uno el tratamiento siete presentó la mayor diferencia significativa del resto de tratamientos, este tratamiento tiene 50 % de almidón de maíz, 50 % almidón de yuca y 35.86 % de glicerol. Sobral *et al.* (2004), indica que a mayor cantidad de glicerol, disminuirá la opacidad. Por el contrario el tratamiento uno y dos presentaron la menor media de opacidad, ambos poseen mayor porcentaje de almidón de maíz (75%) y glicerol (60 y 40%), con el efecto de mayor transparencia.

Sin embargo estos tratamientos no mantienen la menor diferencia estadística en el día seis. Se cree que se deba a un reordenamiento de las partículas y exudado de las moléculas de agua (Alves 2013) y hay un reordenamiento de las moléculas de amilosa en la matriz. Al día seis el tratamiento 14 (control) presentó la mayor tasa de opacidad, dejando pasar menor cantidad de luz. Como se puede observar en el cuadro 14, existen diferencias del resto de tratamientos, ya que este posee 100 % almidón de yuca. Caso contrario del tratamiento seis, que es un punto axial dentro del experimento ($\pm\alpha$) con un 85.14 % de almidón de maíz. Efecto que conservo al día 12.

En el día 12 el tratamiento uno y seis presentaron la menor tasa de opacidad, teniendo similitud entre sus medias. El tratamiento 12 (punto central) presentó la mayor tasa de opacidad, se le puede atribuir al error muestral o bien en un incremento a su espesura (Oliveira *et al.* 1996). No se le puede atribuir el efecto de una de las variables sobre la opacidad debido a que no presentaron significancia ninguna de las variables, y el tratamiento control es para fines comparativos.

Cuadro 12. Efecto de la combinación de almidón de maíz y yuca, y glicerol en la opacidad de los tratamientos a través del tiempo.

TRT	Opacidad (\pm D.E) [¥]		
	Día 1	Día 6	Día 12
1	2.36 \pm 0.07 ^{E y}	2.97 \pm 0.10 ^{EF yx}	2.92 \pm 0.38 ^{G x}
2	2.70 \pm 0.13 ^{E y}	3.32 \pm 0.23 ^{EDF x}	3.73 \pm 0.27 ^{FE x}
3	4.57 \pm 0.43 ^{C y}	5.31 \pm 0.04 ^{CB x}	5.17 \pm 0.21 ^{B y x}
4	4.55 \pm 0.22 ^{C y}	5.18 \pm 0.08 ^{CB x}	4.57 \pm 0.05 ^{CB D y}
5	5.61 \pm 0.09 ^{B x}	3.88 \pm 0.22 ^{D z}	4.46 \pm 0.04 ^{CD y}
6	2.73 \pm 0.18 ^{E x}	2.57 \pm 0.27 ^{F x}	3.13 \pm 0.56 ^{FG x}
7	7.37 \pm 0.05 ^{A x}	5.54 \pm 0.06 ^{CB y}	4.77 \pm 0.09 ^{CB z}
8	5.19 \pm 0.28 ^{C x}	3.27 \pm 0.42 ^{EDF y}	5.16 \pm 0.39 ^{C y x}
9	4.67 \pm 0.19 ^{C x}	4.80 \pm 0.15 ^{C x}	4.04 \pm 0.12 ^{Ed y}
10	4.01 \pm 0.03 ^{D x}	3.72 \pm 0.18 ^{ED y}	3.93 \pm 0.05 ^{Ed yx}
11	5.51 \pm 0.04 ^{B x}	5.31 \pm 0.22 ^{CB yx}	5.13 \pm 0.03 ^{CB y}
12	5.51 \pm 0.02 ^{B y}	5.60 \pm 0.10 ^{B y}	6.29 \pm 0.14 ^{A x}
13	2.52 \pm 0.09 ^{E y}	3.18 \pm 0.47 ^{EDF yx}	3.63 \pm 0.04 ^{FE x}
14	5.43 \pm 0.00 ^{B y}	6.58 \pm 0.51 ^{A x}	5.08 \pm 0.09 ^{CB y}

Valor seguido por una letra mayúscula A-G (columna) son estadísticamente diferentes P<0.05

Valor seguido por una letra minúscula x-z (fila) son estadísticamente diferentes P<0.05

¥: Media \pm Desviación estándar.

Fuerza de Perforación. Por medio del análisis de perforación se determinó la fuerza necesaria (N) para que una sonda perforara perpendicularmente la película. La fuerza aplicada fue en función al desplazamiento resultante a la deformación hasta el recorrido para llegar a un punto pico donde ocurriría la fuerza de ruptura (Vicentini 2003).

Según Sobral *et al.*(1998), la deformación a la ruptura está relacionada con la longitud inicial de la película en la prueba para determinar la resistencia a la perforación. Es decir cuando se aplica cierta fuerza sobre una superficie, esta puede resistir hasta cierto tiempo, manteniendo su estructura inicial durante un alargamiento.

En la sección de anexos se encuentra las medias de los resultados de cada experimento sobre la fuerza de perforación a través del tiempo. En el cuadro 13 se encuentran los resultados del día seis con una variación de 1.43 hasta 6.02 N. El tratamiento siete presento la media con mayor diferencia estadística, este tratamiento es un punto axial ($-\alpha$) de la variable glicerol con un balance entre las proporciones de almidón. Lo que hay una mayor fuerza de perforación en una reducción del porcentaje de glicerol (Rocha 2009). Por el contrario del tratamiento tres que presento la menor media y diferencia estadística siendo diferente al resto de tratamientos. En la formulación del tratamiento tres, incluye un alto porcentaje de glicerol del 60 % y una reducción del porcentaje de maíz 25 %.

Cuadro 13. Efecto de la combinación de almidón de maíz y yuca, y glicerol en la fuerza de perforación de los tratamientos del día seis.

Tratamiento	Almidón	Almidón	Glicerol	Fuerza de perforación
	Maíz	Yuca		
	%	%	%	N (\pm D.E) [¥]
1	75.00	25.00	60.00	2.78 \pm 0.84 ^{CFED}
2	75.00	25.00	40.00	4.63 \pm 0.94 ^B
3	25.00	75.00	60.00	1.43 \pm 0.44 ^G
4	25.00	75.00	40.00	3.28 \pm 0.54 ^{CDE}
5	14.65	85.35	50.00	2.53 \pm 1.05 ^{GCFDE}
6	85.35	14.65	50.00	3.66 \pm 0.92 ^{CB}
7	50.00	50.00	35.86	6.02 \pm 1.55 ^A
8	50.00	50.00	64.14	2.04 \pm 0.31 ^{GF}
9	50.00	50.00	50.00	2.92 \pm 0.68 ^{CFDE}
10	50.00	50.00	50.00	2.40 \pm 0.29 ^{GFDE}
11	50.00	50.00	50.00	2.90 \pm 0.48 ^{CFDE}
12	50.00	50.00	50.00	2.20 \pm 0.27 ^{GFE}
13	50.00	50.00	50.00	3.61 \pm 0.53 ^{CB}
14	0.00	100.00	50.00	3.46 \pm 0.39 ^{CD}

Valor seguido por una letra mayúscula (columna) son estadísticamente diferentes $P < 0.05$

¥: Media \pm Desviación estándar.

Por lo que se realizó las pruebas estadísticas para determinar cuáles de las variables influyen sobre la Fuerza de perforación del bioplástico (Cuadro 14). La variable lineal de almidón de maíz fue significativa ($P<.005$) mostrando un efecto lineal positivo en el incremento de la fuerza de perforación sobre la adición de almidón de maíz sobre la matriz. La variable glicerol en su nivel lineal fue altamente significativa ($P<0.01$) con un efecto negativo, que a mayor cantidad de glicerol disminuirá la fuerza de perforación del bioplástico. El nivel cuadrático de la variable glicerol ($P<0.1$) indico un punto máximo positivo, en el que habrá un punto limite en el que la adición de glicerol no aumentara la fuerza por perforación sino que empezará a disminuir. El coeficiente de determinación ($R^2 = 0.86$) demostró que el 86 % de la variación de los datos se ajusta al modelo. La falta de ajuste no fue significativa por lo que el modelo se ajusta para ser de carácter predictivo (Thompson 1982).

Cuadro 14. Coeficientes de regresión y sus respectivas probabilidades (p) de un modelo de regresión cuadrático aplicado en la fuerza de perforación de un Bioplástico

Coeficientes	Fuerza de perforación
Intercepto	2.81E+00 ***
X ₁	5.41E-01 **
X ₁ ²	5.48E-03 n.s
X ₂	-1.17E+00 ***
X ₂ ²	4.83E-01*
X ₁ X ₂	0.00E+00 n.s
R ²	0.86
Falta de Ajuste	1.22 n.s

X₁: Almidón de Maíz (%); X₂: Glicerol (%)

n.s =No significativo

*= Significativo a un nivel del 10% de probabilidad

**= Significativo a un nivel del 5% de probabilidad

***= Significativo a un nivel del 1% de probabilidad

Se construyó una ecuación que represente el modelo predictivo de la fuerza de perforación:

$$Fuerza\ de\ perforación\ (N) = 2.81 + 0.541X_1 + 1.171X_2 + 0.483X_2^2 \quad [16]$$

En base al modelo de fuerza de perforación se creó un gráfico de superficie respuesta (Figura 7). Se puede observar de la interacción de dos variables en diferentes niveles sobre la variable de interés, sin interacción entre ellas con un ligero efecto convexo.

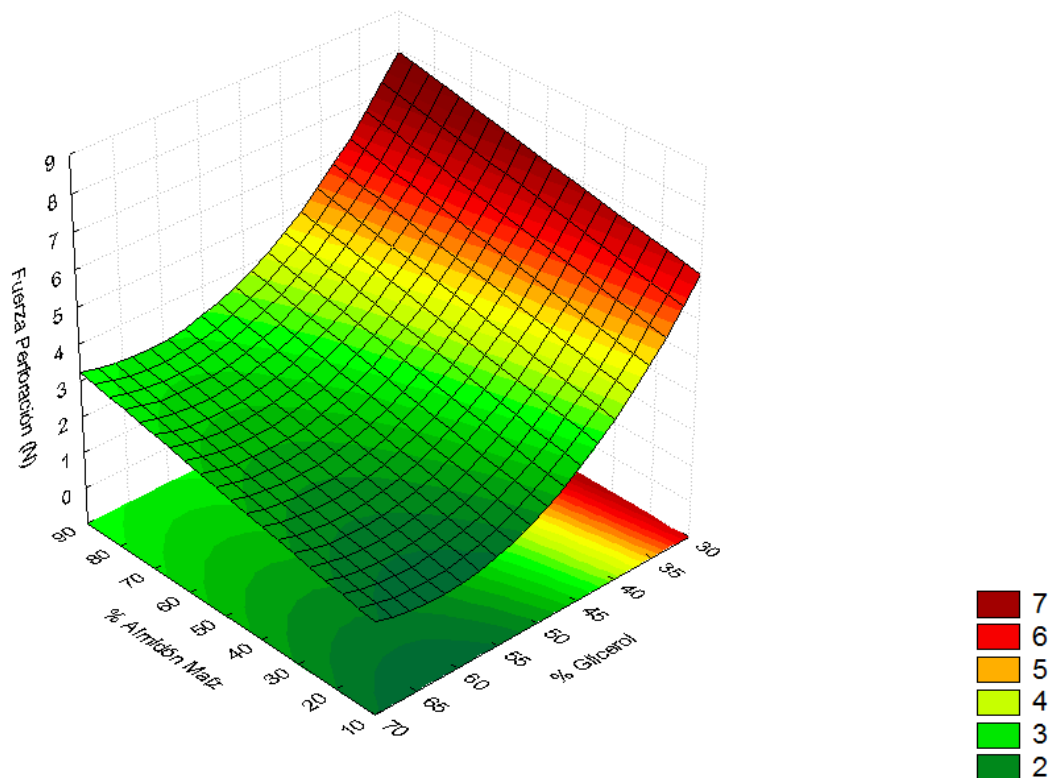


Figura 7. Efecto del porcentaje de almidón de maíz y porcentaje de glicerol sobre la fuerza de perforación de un bioplástico de almidón combinado y glicerol.

El incorporar glicerol a la red de almidón en cantidades mayores al 30%, favorece a la reducción de las fuerzas intermoleculares, reduciendo así mismo la fuerza de perforación de los filmes (Rocha 2009). Este efecto también fue encontrado por Vicentini (2003), Sobral *et al.* (1998) y Monterrey (2000).

Dentro del experimento se vio una reducción de 6.02 a 1.43 N en la diferencia de 35.86 y 60 % de glicerol. Alves *et al.* (2007), incorporó glicerol de 20 y 45% con amilosa (15 %) en películas de almidón de yuca por el método “casting” obtuvo un comportamiento de 19.6 a 7.9 N con el aumento del glicerol. Vicentini (2003) verifico que el incremento de glicerina, sorbitol o dietilenoglicol de 10 a 25% provoco una reducción lineal en la fuerza de perforación de 7.25 a 4.28 N, de 10.04 a 8.45 N de 7.02 a 4.16 N, respectivamente.

Deformación por perforación La deformación es un parámetro que mide la capacidad del filme de ceder hasta romperse (Alves 2013). En la sección de anexos se encuentra la separación de medias donde muestra el comportamiento de los experimentos a través del tiempo. El cuadro 15 presenta los resultados del día seis.

Según el cuadro 15 el tratamiento ocho presento la mayor deformación, con igual proporción de almidones, posee un 64.14 % de glicerol (punto axial + α) con la mayor cantidad posible de glicerol dentro del experimento. Y los tratamientos 10, 11 y 12 presentaron la menor media de Deformación, todos estos tratamientos eran las repeticiones del punto central en el experimento. El porcentaje de glicerol entre ambas diferencias de medias fue el punto mayor de glicerol y el punto medio por lo que no se puede identificar si el glicerol tuvo efecto sobre la deformación de las películas.

Cuadro 15. Efecto de la combinación de almidón de maíz y yuca, y glicerol en la deformación por perforación.

Tratamiento	Almidón	Almidón	Glicerol	Deformación
	Maíz	Yuca		
	%	%	%	% (\pm D.E) [¥]
1	75.00	25.00	60.00	4.81 \pm 1.41 ^{DC}
2	75.00	25.00	40.00	7.82 \pm 1.97 ^{BA}
3	25.00	75.00	60.00	6.34 \pm 1.75 ^{BDC}
4	25.00	75.00	40.00	5.28 \pm 1.77 ^{BDC}
5	14.65	85.35	50.00	5.82 \pm 2.79 ^{BDC}
6	85.35	14.65	50.00	6.73 \pm 2.14 ^{BDAC}
7	50.00	50.00	35.86	5.49 \pm 2.17 ^{BDC}
8	50.00	50.00	64.14	9.15 \pm 1.91 ^A
9	50.00	50.00	50.00	5.59 \pm 1.60 ^{BDC}
10	50.00	50.00	50.00	4.71 \pm 0.91 ^D
11	50.00	50.00	50.00	4.71 \pm 1.15 ^D
12	50.00	50.00	50.00	4.36 \pm 1.26 ^D
13	50.00	50.00	50.00	6.26 \pm 1.43 ^{BDC}
14	0.00	100.00	50.00	7.49 \pm 1.66 ^{BAC}

Valor seguido por una letra mayúscula (columna) son estadísticamente diferentes $P < 0.05$

¥: Media \pm Desviación estándar.

En el cuadro 16 se encuentran los coeficientes de regresión y las variables significativas sobre la deformación cuando ocurre una ruptura por perforación:

Cuadro 16. Coeficientes de regresión y sus respectivas probabilidades (p) de un modelo de regresión cuadrático aplicado en la deformación por perforación de un Bioplástico

Coeficientes	Deformación
Intercepto	5.13E+00 ***
X ₁	2.88E-01 n.s
X ₁ ²	3.87E-01 n.s
X ₂	4.01E-01n.s
X ₂ ²	9.20E-01 **
X ₁ X ₂	-1.02E+00 *
R ²	0.55
Falta de Ajuste	7.55 n.s

X₁: Almidón de Maíz (%); X₂: Glicerol (%)

n.s =No significativo

*= Significativo a un nivel del 10% de probabilidad

**= Significativo a un nivel del 5% de probabilidad

***= Significativo a un nivel del 1% de probabilidad

La variable glicerol en su nivel cuadrático resulto significativa ($P < 0,05$), que indica un punto máximo sobre la adición de glicerol en la deformación por perforación. La interacción entre la variable % almidón de maíz y el % de glicerol resulto tener un efecto negativo, en el que el aumento de ambas variables reducirá la deformación de las películas. El coeficiente de determinación (R^2) presento un pobre ajuste de la variación de los datos al modelo con un 55 %. La falta de ajuste no fue significativa, por lo que los datos pueden adaptarse al modelo (Ecuación 17):

$$Deformación (\%) = 5.13 + 0.920X_2^2 - 1.02X_1X_2 \quad [17]$$

En base al modelo anterior se construyó un gráfico de superficie respuesta donde muestra el efecto de las variables significativas. Alves (2013), encontró negativo el efecto cuadrático de la incorporación de glicerol en películas de almidón de yuca reforzados con cascará de maracuyá. Rocha (2009), encontró también el efecto negativo entre la interacción del glicerol con cada uno de las variables de pH y extracto de soya.

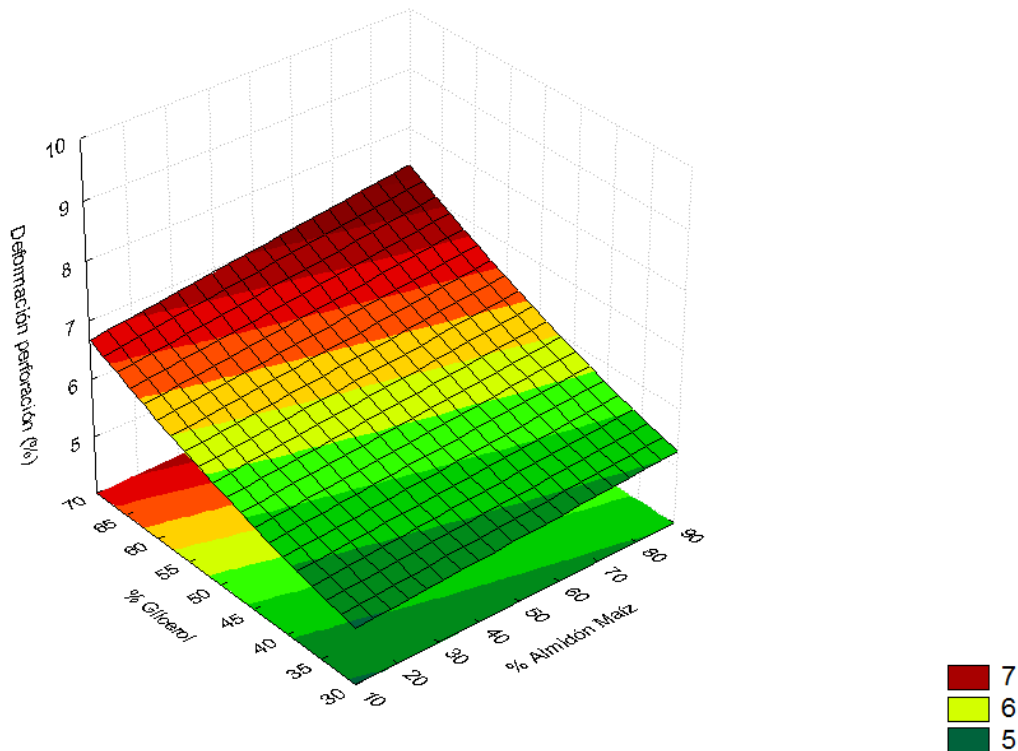


Figura 8. Efecto del porcentaje de almidón de maíz y porcentaje de glicerol sobre la deformación por perforación de un bioplástico de almidón combinado y glicerol.

El aumentar el porcentaje de almidón de maíz respecto al de yuca, no tiene un efecto proporcional sobre la deformación, ya que el porcentaje de glicerol a medida que aumenta y la proporción entre almidones se mantiene constante habrá un aumento en la deformación por perforación. Si el porcentaje de glicerol se mantiene constante y la combinación la proporción de almidón de maíz aumenta sobre la de yuca, se obtendrá también un aumento en la deformación.

Como han encontrado otros autores la adición a la matriz de la molécula de glicerol favorecerá a una mayor deformación. Mendez *et al.* (2008), tuvieron más significativo el aumento de glicerol en películas de almidón (90 %) y gelatina (10 %) donde obtuvieron una interacción lineal con la deformación. Vicentini (2003), también vio el efecto del glicerol, en películas de almidón de yuca tuvo un aumento de 3.28 % a 7.34 % y de 2.64 a 4.03 %, con el incremento del porcentaje de glicerina y sorbitol de 10 a 25 %. Monterrey y Sobral (1999), también verificaron que el aumento de la deformación por perforación se dio con el aumento de un plastificante. Ellos justificaron que la presencia de un plastificante disminuye las interacciones moleculares que pueden darse, aumentando una movilidad de las cadenas, formando filmes menos resistentes pero más elásticos.

El comportamiento contrario del glicerol a bajas concentraciones se conoce como efecto antiplastificante (Lourdin *et al.* 1997; Chang *et al.* 2006) y sorbitol (Gaudin *et al.* 1999).

Tensión. La resistencia máxima antes de la ruptura por el método de elongación se conoce como tensión. La tensión es la relación entre la fuerza y el área de la sección transversal inicial de la muestra. Expresado en MPa, N/m² o kgf/cm². O bien la relación entre la fuerza máxima de tensión por unidad de largo inicial del cuerpo. Es un parámetro alternativo para caracterizar la resistencia (Sarantopoulos 2002).

Los resultados del análisis de tensión a través del tiempo se encuentran en la sección de anexos. Los resultados del día seis se encuentran en el cuadro 17 que muestra las medias de los catorce tratamientos (combinaciones) con una variación desde 0.35 hasta 4.34 MPa.

Cuadro 17. Efecto de la combinación de almidón de maíz y yuca, y glicerol en la tensión de los tratamientos

Tratamiento	Almidón	Almidón	Glicerol	Tensión
	Maíz	Yuca		
	%	%	%	MPa (\pm D.E) [¥]
1	75.00	25.00	60.00	1.09 \pm 0.14 ^{EDF}
2	75.00	25.00	40.00	1.47 \pm 0.25 ^{ED}
3	25.00	75.00	60.00	0.35 \pm 0.09 ^G
4	25.00	75.00	40.00	2.34 \pm 0.27 ^B
5	14.65	85.35	50.00	1.30 \pm 0.41 ^{EDF}
6	85.35	14.65	50.00	1.11 \pm 0.34 ^{EDF}
7	50.00	50.00	35.86	4.34 \pm 1.02 ^A
8	50.00	50.00	64.14	0.78 \pm 0.16 ^{GF}
9	50.00	50.00	50.00	1.23 \pm 0.34 ^{EDF}
10	50.00	50.00	50.00	0.73 \pm 0.15 ^{GF}
11	50.00	50.00	50.00	1.67 \pm 0.38 ^{CD}
12	50.00	50.00	50.00	1.05 \pm 0.26 ^{EF}
13	50.00	50.00	50.00	2.17 \pm 0.41 ^{CB}
14	0.00	100.00	50.00	1.31 \pm 0.29 ^{EDF}

Valor seguido por una letra mayúscula (columna) son estadísticamente diferentes P<0.05

¥: Media \pm Desviación estándar.

El tratamiento siete presento la mayor diferencia estadística, con un 35.86% de glicerol y una combinación 50-50 entre almidones. El tratamiento tres presentó la menor diferencia, con un 60% de glicerol, no se encontró diferencias entre el tratamiento ocho, punto axial de la variable glicerol. El tratamiento siete también posee una combinación 50-50 entre almidones.

El cuadro 18 muestra los resultados del análisis estadístico mostrando la significancia de las variables independientes sobre la tensión de las películas biodegradables.

Cuadro 18. Coeficientes de regresión y sus respectivas probabilidades (p) de un modelo de regresión cuadrático aplicado en la tensión de un Bioplástico

Coeficientes	Tensión
Intercepto	1.37E+00 ***
X ₁	-5.00E-02 n.s
X ₁ ²	-2.35E-01 n.s
X ₂	-9.29E-01 ***
X ₂ ²	4.57E-01 n.s
X ₁ X ₂	4.03E-01 n.s
R ²	0.77
Falta de Ajuste	1.58 n.s

X₁: Almidón de Maíz (%); X₂: Glicerol (%)

n.s =No significativo

*= Significativo a un nivel del 10% de probabilidad

**= Significativo a un nivel del 5% de probabilidad

***= Significativo a un nivel del 1% de probabilidad

La variable glicerol en su nivel lineal resulto negativa ($P < 0.01$), lo que indica una relación lineal negativa entre la tensión y el glicerol. El 77% de los datos representa el modelo matemático, y la falta de ajuste no fue significativa lo que los datos si se ajustaran al modelo, prediciendo una tendencia (Thompson 1982). En base a los resultados se creó un modelo que prediga la tensión del bioplástico.

$$Tensión = 1.73 - 0.923X_2 \quad [18]$$

El modelo de la ecuación 18, indica un intercepto 1.73 MPa y por cada aumento en una unidad de glicerol disminuye 0.923 unidades la tensión (Figura 9). Mismo efecto visto por Rocha (2009), lo que sugiere concentraciones de glicerol entre 20 y 25% favorecen la tensión entre las cadenas macromoleculares. Resultados similares por Lima *et al.* (2007), al verificar un aumento en la tensión de películas de alginato de 18 a 49 MPa con la reducción de sorbitol de 30 a 0%.

La mayor tensión fue de 4.34 MPa que al compararla con los resultados de Galicia-García *et al.* (2012), fueron similares a 4.4 MPa (5% bagazo) en la tensión de filmes de almidón de maíz y papa, reforzados con fibra de bagazo de caña. La introducción de grupos funcionales a la matriz química del almidón hace que presente mayores valores en las variables de interés. La modificación química del almidón y la combinación con polietileno presento mayores valores de Tensión que un almidón nativo. Por lo que películas elaboradas con almidones modificados mostraron un incremento en el esfuerzo de tensión (Yeon *et al.* 2006).

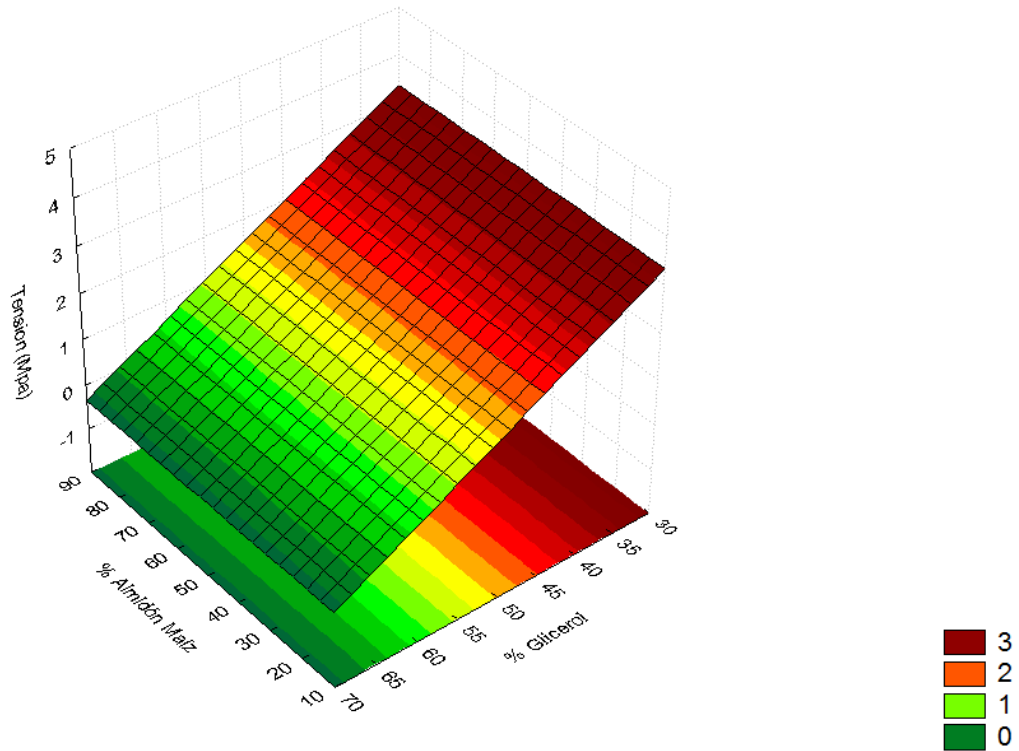


Figura 9. Efecto del porcentaje de almidón de maíz y porcentaje de glicerol sobre la tensión por elongación de un bioplástico de almidón de maíz, yuca, y glicerol.

Deformación. La deformación por elongación es una relación entre la elongación de la muestra a la ruptura y su longitud inicial (Sarantópulos 2002). En el cuadro 19 se desglosa los resultados del análisis por deformación a través del tiempo. En el día uno el tratamiento tres presento la mayor deformación con un 71% y un 30% el tratamiento siete siendo la menor deformación. El tratamiento tres tiene un 60 % de glicerol y una proporción Almidón de Maíz y Yuca de 25:75. Y el tratamiento siete un 35% de glicerol. Por lo que a primera vista se le atribuye una mayor deformación por la adición de glicerol.

Durante el día seis los tratamientos tres y siete no presentaron el mismo comportamiento. Es el tratamiento 14 el que presento una mayor deformación, siendo el tratamiento control con un 100% de Yuca, al igual que el tratamiento tres al día uno, ambos tienen cantidad altas de almidón de yuca nuevamente el tratamiento siete presento la menor deformación, al igual que el tratamiento seis. El tratamiento posee una alta cantidad de almidón de maíz (85%), como se discutió anteriormente el aumento del almidón de yuca aumenta la deformación debido a su mayor asociación de amilosa en la matriz a diferencia del almidón de maíz, que posee mayor amilopectina.

Durante el día 12 el tratamiento ocho presento la mayor diferencia estadística respecto a a deformación, alrededor de un 78% de deformación. El tratamiento ocho posee la mayor cantidad posible de glicerol con un 64.14%, y una proporción de 50:50 de almidones. Lo que nuevamente se le atribuye a la incorporación de un plastificante, sin embargo no se pudo presentar un modelo, ya que las variables no fueron significativas. Y el tratamiento siete presento de nuevo, la menor deformación, por efecto de tener la menor cantidad de glicerol posible (punto axial $-\alpha$).

Cuadro 19. Efecto de la combinación de almidón de maíz y yuca, y glicerol en la deformación por elongación de los tratamientos a través del tiempo.

TRT	Dia 1	Dia 6	Dia 12
	% (\pm D.E) [¥]		
1	50.35 \pm 13.95 ^{EBDACa}	44.63 \pm 8.91 ^{BACa}	48.94 \pm 3.78 ^{BCDa}
2	54.93 \pm 14.44 ^{EBDAFCa}	41.12 \pm 6.77 ^{BACba}	60.50 \pm 18.17 ^{Ba}
3	71.48 \pm 16.71 ^{Aa}	46.88 \pm 15.88 ^{BACb}	57.39 \pm 16.28 ^{BCba}
4	37.46 \pm 5.02 ^{EFGa}	39.38 \pm 5.45 ^{Bca}	37.03 \pm 7.78 ^{EDa}
5	48.14 \pm 14.81 ^{EBDFCGa}	50.86 \pm 11.37 ^{BACa}	47.76 \pm 11.77 ^{BCDa}
6	34.02 \pm 9.84 ^{FGb}	35.17 \pm 5.30 ^{Cb}	61.79 \pm 19.60 ^{BAa}
7	30.76 \pm 7.99 ^{Ga}	35.17 \pm 6.57 ^{Ca}	28.17 \pm 8.00 ^{Ea}
8	59.46 \pm 24.52 ^{BDACb}	48.49 \pm 14.32 ^{BACb}	78.47 \pm 6.52 ^{Aa}
9	56.61 \pm 6.68 ^{EBDACa}	38.84 \pm 12.75 ^{BCb}	36.11 \pm 7.73 ^{EDb}
10	40.48 \pm 11.45 ^{EDFGa}	36.48 \pm 7.75 ^{BCx}	38.74 \pm 10.39 ^{EDa}
11	31.90 \pm 8.89 ^{FGa}	39.5 \pm 11.54 ^{Bca}	35.60 \pm 8.74 ^{EDa}
12	61.16 \pm 12.46 ^{BACa}	36.92 \pm 13.29 ^{BCb}	42.67 \pm 3.08 ^{ECDb}
13	44.41 \pm 9.27 ^{EDFCGa}	52.39 \pm 12.47 ^{BAa}	50.57 \pm 8.31 ^{BCDa}
14	66.79 \pm 8.82 ^{BAa}	56.01 \pm 7.28 ^{Ab}	46.09 \pm 9.40 ^{BCDc}

Valor seguido por una letra mayúscula (columna) son estadísticamente diferentes $P < 0.05$

Valor seguido por una letra minúscula (fila) son estadísticamente diferentes $P < 0.05$

¥: Media \pm Desviación estándar.

Módulo de Elasticidad. El módulo de elasticidad es la razón entre la tensión y la deformación dentro del límite elástico, en el que la deformación es totalmente proporcional a la tensión (Mano y Mendes 1999). Expresa que tan rígido es el material. En el cuadro 23 muestra las medias resultantes del análisis de elongación, resultado derivado de la elongación y deformación. El comportamiento a través del tiempo se muestra en la sección de anexos.

El tratamiento siete (cuadro 20) presento la mayor media de módulo de elasticidad por lo que es considerado el tratamiento con mayor rigidez. El tratamiento siete posee el menor porcentaje de glicerol y una combinación balanceada entre almidones, por lo que se le atribuye su rigidez a la combinación de almidón respecto a la de glicerol. Por el contrario de los tratamientos ocho y tres presentaron el menor módulo de elasticidad, los tratamientos poseen las cantidades mayores de glicerol (60 y 64.14 %) serán los tratamientos con la menor rigidez. Se realizó un análisis estadístico para verificar la significancia de las variables sobre el módulo de elasticidad de los experimentos (Cuadro 21).

Cuadro 20. Efecto de la combinación de almidón de maíz y yuca, y glicerol en el módulo de elasticidad.

Tratamiento	Almidón	Almidón	Glicerol	Módulo de Elasticidad
	Maíz	Yuca		
	%	%	%	MPa (\pm D.E) [¥]
1	75.00	25.00	60.00	0.04 \pm 0.01 ^E
2	75.00	25.00	40.00	0.08 \pm 0.02 ^{CED}
3	25.00	75.00	60.00	0.01 \pm 0.00 ^E
4	25.00	75.00	40.00	0.17 \pm 0.03 ^B
5	14.65	85.35	50.00	0.06 \pm 0.03 ^{ED}
6	85.35	14.65	50.00	0.05 \pm 0.02 ^{ED}
7	50.00	50.00	35.86	0.50 \pm 0.17 ^A
8	50.00	50.00	64.14	0.02 \pm 0.00 ^E
9	50.00	50.00	50.00	0.07 \pm 0.02 ^{CED}
10	50.00	50.00	50.00	0.03 \pm 0.01 ^E
11	50.00	50.00	50.00	0.14 \pm 0.04 ^{CB}
12	50.00	50.00	50.00	0.05 \pm 0.01 ^{ED}
13	50.00	50.00	50.00	0.12 \pm 0.02 ^{CB}
14	0.00	100.00	50.00	0.07 \pm 0.02 ^{CED}

Valor seguido por una letra mayúscula (columna) son estadísticamente diferentes P<0.05

¥: Media \pm Desviación estándar.

El intercepto (Cuadro 21) resulto no ser significativo al igual que la falta de ajuste, por lo que los datos no se adecuan correctamente al modelo. Pero el coeficiente de determinación (R^2) mostro que la variación de los datos se adaptó en un 74% al modelo. Sin embargo este modelo no puede ser utilizado (Thompson 1982). En el que la variable glicerol en sus niveles lineal ($P < 0.01$) y cuadrático ($P < 0.05$) resultaron significativas.

Cuadro 21. Coeficientes de regresión y sus respectivas probabilidades (p) de un modelo de regresión cuadrático aplicado en la tensión de un Bioplástico

Coeficientes	Módulo de Elasticidad
Intercepto	8.27E-02 n.s
X ₁	-9.34E-03 n.s
X ₁ ²	-3.56E-02 n.s
X ₂	-1.10E-01 *
X ₂ ²	6.90E-02 **
X ₁ X ₂	3.00E-02 n.s
R ²	0.74
Falta de Ajuste	0.04 **

X₁: Almidón de Maíz (%); X₂: Glicerol (%)

n.s = No significativo

*= Significativo a un nivel del 10% de probabilidad

**= Significativo a un nivel del 5% de probabilidad

***= Significativo a un nivel del 1% de probabilidad

El efecto de la variable glicerol fue encontrado por Lima *et al.* (2007), ellos asumen que en el aumento de sorbitol en un 30% redujo las interacciones polímero- polímero, aumentando el volumen libre entre las cadenas, por lo que dan lugar a una reducción en el módulo de elasticidad. Chandra y Rustgi (1997), afirman que el módulo de elasticidad es proporcional al valor de la tensión.

Función de utilidad. En la figura 10 muestra los valores óptimos de las variables independientes sobre las diferentes respuestas. Bajo las restricciones de un baja espesura, solubilidad, diferencia de color, opacidad, módulo de elasticidad, y permeabilidad al vapor de agua, y una alta tensión, fuerza de perforación y deformación por perforación se determinó un 77.14 % almidón de maíz, 22.86% almidón de yuca y 46.24% de glicerol.

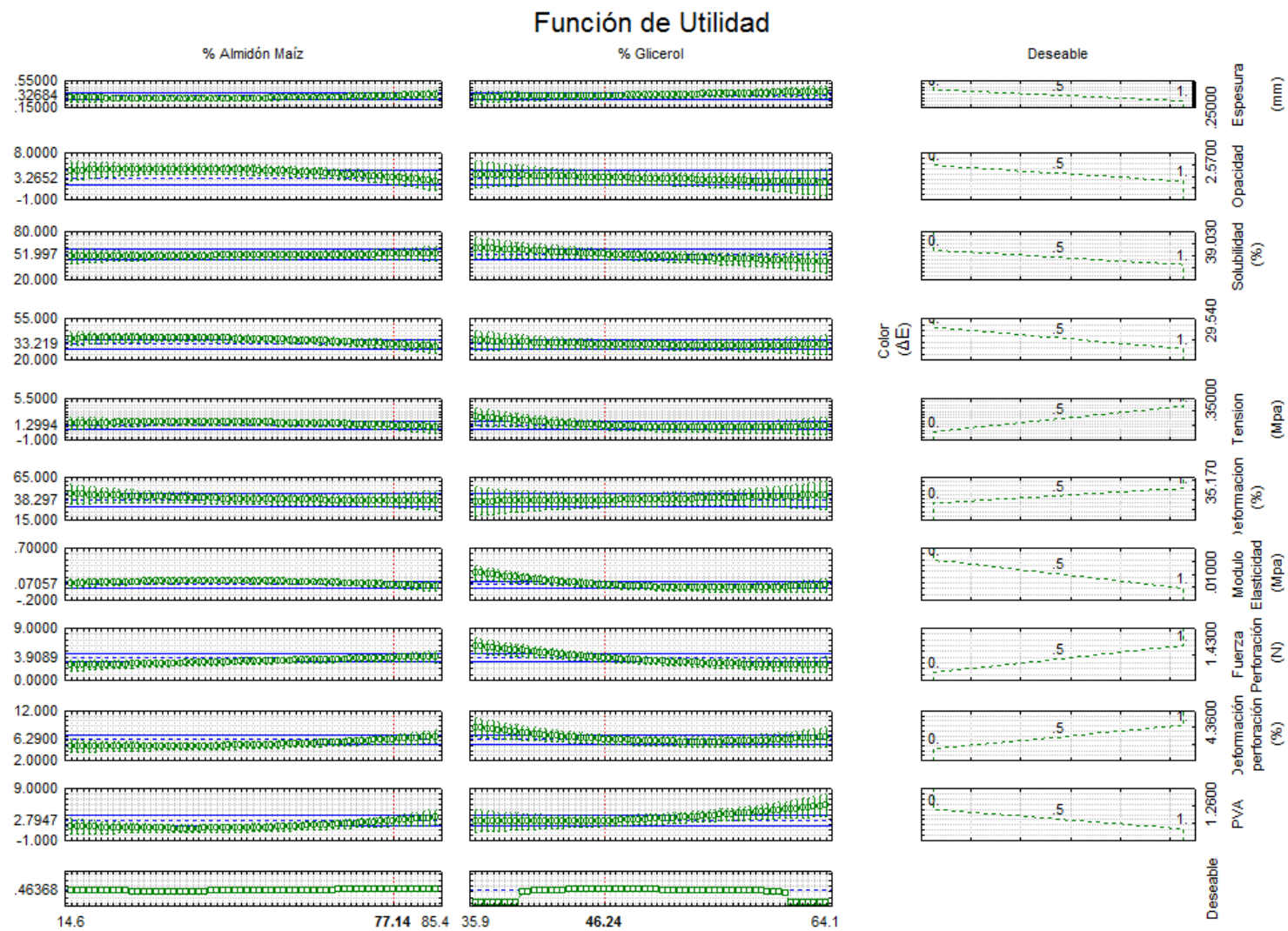


Figura 10 Valores óptimos de las variables independientes sobre las propiedades físicas y de barrera de un bioplástico.

4. CONCLUSIONES

- Se determinó que la combinación de 77.14 y 22.86% de almidón de maíz y yuca respectivamente con 46.24% de glicerol (p/v), optimizarán todas las variables físicas y de barrera del bioplástico.
- La interacción de almidón de maíz y glicerol resultó estadísticamente significativa en la deformación por perforación.
- Se elaboraron seis modelos matemáticos de segundo orden con efecto lineal cuadrático, dos modelos predictivos y cuatro de carácter tendencioso.

5. RECOMENDACIONES

- Incorporar a la matriz del bioplástico una fuente de proteína o fibra para la mejora de las propiedades físicas y de barrera y una fuente antimicrobiana para la estabilidad microbiológica.
- Caracterizar el perfil reológico de las soluciones filmogénicas.
- Evaluar la degradación de las películas en diferentes ambientes.
- Implementar la metodología superficie respuesta en futuras investigaciones dentro del Departamento de Agroindustria Alimentaria.

6. LITERATURA CITADA

Aguilar-Méndez, M.A., E.S. Martín-Martínez., S.A. Tomás., A. Cruz-Orea and M.R., Jaime-Fonseca. 2008. Gelatine–starch films: physicochemical properties and their application in extending the post-harvest shelf life of avocado (*Persea Americana*). *Journal of The Science Of Food And Agriculture*. V. 88. 185–193 p.

Alves, T. 2013. Caracterização físico-química de bioplásticos elaborados por extrusão e termoprensagem reforçados com casca de maracujá (*Passiflora edulis Sp.*). dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de mestre em ciência de alimentos. Universidade Federal Rural Do Rio De Janeiro Instituto De Tecnologia. Rio De Janeiro, Brazil.

Alves, V, S. Mali, A. Beleia and M. Grossmann. 2007. Effect of glycerol and amylose enrichment on cassava starch film properties. *Journal Of Food Engineering*, V. 78, N. 8, 941–946 p.

American Society for Testing and Materials (ASTM). 1989. Standard test methods for water vapor transmission of materials (E96-80) In: *Annual Book of ASTM Standards*. Philadelphia. 730–739 p.

American Society for Testing and Materials (ASTM). 1995. Standard test methods for tensile properties of thin plastic sheeting (D 828-95a) in: *annual book of ASTM standards*. Philadelphia.

Banker, G. A. Gore and J. Swarbrick. 1995. Water vapor transmission properties of free polymer films. *Journal of pharmaceutical sciences*, v.18, p.457-466, 1966. apud Park, H. J.; Chinnan, M. S. Gas and water vapor barrier properties of edible films from protein and cellulosic materials. *Journal of Food Engineering*. v.25, n.4. 497-507 p.

Batista, J., P. S. Tanada-Palmu. e C. R. F. Grosso. 2005. Efeito da adição de ácidos graxos em filmes à base de pectina. *Ciência E Tecnologia De Alimentos*, V. 25, N. 4, 781- 788 p.

Bertuzzi, M.A., E.F. Castro, M. Armada, and J.C. Gottifredi. 2007. Water vapor permeability of edible starch based films. *Journal Of Food Engineering*, V. 80, 972–978 p.

Bourtoom, T., M. Chinnan, P. Jantawat and R. Sanguandeeikul. 2006. Effect of select parameters on the properties of edible film from water-soluble fish proteins in surimi wash-water. *Lebensmittel Wissenschaft & Technologie*, V.39, 405–418 p.

Box, G. and D. Behken.1960. Some new three level designs for the study of quantitative variables. *Technometrics*. v 2, n 4. 455-475 p.

Box, G. and N. Draper. 1967. *Empirical model-building with response surface*, a book be published.

Box, G.E.P., W.G.Hunter, and J.S. Hunter. 1978. *Statistics for experimenters: An introduction to desing, data analysis and model building*, New York: John Wiley & Sons.

CAO, N., Y. FU. and J. HE. 2007. Preparation and physical properties of soy protein isolate and gelatin composite films. *Food Hydrocolloids* v.21. 1153–1162 p.

Cereda, M. P., A.C. Bertolini e R.M. Evangelista. 1992. Uso de amido em substituição às ceras na elaboração de “filmes” na conservação pós-colheita de frutas e hortaliças: estabelecimento de curvas de secagem. Recife: Sociedade Brasileira de Mandioca. p.107.

Chandra, R., and R. Rustgi. 1997. Biodegradation of maleated linear low-densitypolyethylene and starch blends. *Polymer degradation and stability*. 56, 185 -202 p.
Chandra, R., Rustgi, R. 1998. *Biodegradable Polymers*. Prog. Polym. Sci., New York, V. 23, 1273-1335 p.

Chang, Y., A. Karim and C. Seow. 2006. Interactive plasticizing-antiplasticizing effects of water and glycerol on the tensile properties on tapioca starch films. *Food Hydrocolloids*, Oxford, V.20.1-8 p.

Cho, S. and.C. Rhee. 2004. Mechanical properties and water vapor permeability of edible films made from fractionated soy proteins with ultrafiltration. *Lebensmittel-Wissenschaft Und- Technologie*, v. 37, n.8. 833–839 p.

Coupland, J., N. Shaw, F. Monahan, E. O’riordan, and M. O’sullivan. 2000. Modeling the effect of glycerol on the moisture sorption behavior of whey protein edible films, *Journal of Food Engineering*, v. 43, p. 25, 2000.

Cuq, B., N. Gontard, S. Guilbert. 1998. Protein as agricultural polymers for packaging production. *Cereal Chemistry*, v.75, n.1.1-9 p.

Donhowe I. and O. Fennema. 1994. Edible films and coatings: characteristics, formation, definitions, and testing methods. In :Krochta JM, Baldwin EA, Nisperos- Carriedo NO editor. *Edible coatings and films to improve food quality*. Lancaster, Pa: Technomic Pub Co. 1-24 p.

Escobar, D. A. Sala, C. Silvera, R. Harispe y R. Márquez. 2009. Películas biodegradables y comestibles desarrolladas en base de aislado de proteínas de suero lácteo: estudio de dos métodos de elaboración y del uso de sorbato de potasio como conservador. *Revista Del Laboratorio Tecnológico Del Uruguay* No. 4. 33-36 p.

Ferreira, A. 1986. Novo Dicionário De Língua Portuguesa, 2ª Ed., 35ª Impressão, Editora Nova Fronteira.

Fishman, M.L. 2004. Extrusion of pectin and glycerol with various combinations of orange albedo and starch. *Carbohydrate Polymers*. v. 57, n. 4. 401–413 p.

Galicia Garcia T.G., F. Martinez-Bustos, A.O. Jimenez-Arevalo, D. Arencon, J. Games-Perez and A.B. Martinez 2012. Films of native and modified starch reinforced with fiber: influence of some extrusion variables using response surface methodology. *Journal of Applied Polymer Science*, v. 126, p. E326–E335.

García, F.T. and Sobral, P.J.A. 2005. Effect of the thermal treatment of the filmogenic solution on the mechanical properties, color and opacity of films based on muscle proteins of two varieties of tilapia. *Lebensmittel Wissenschaft & Technologie*, V. 38, 289–296 p.

García, M.A., M.N. Martino A and N.E. Zaritzky. 2000. Microstructural characterization of plasticized starch-based films. *Starch/Stärke*, V. 52, N. 4, 118–124 p.

Gaudin, S., D. Lourdin, D. Botlan, J. Ilari and P. Colonna. 1999. Plasticisation and mobility in starch-sorbitol films. *Journal Of Cereal Science*, London, V.29. 273-284 p.

Gontard, N., S. Guilbert and J. Cuq. 1992. Edible wheat gluten films: influence of the main processes variables on films properties using response surface methodology. *Journal of Food Science*, 57(1): 190-195 p.

Gontard, N., Guilbert, S.; Cuq, J. L. 1993. Water and glycerol as plasticizers affect mechanical and water vapor barrier properties of an edible wheat gluten film. *Journal of Food Science*, V. 58, N. 1, P. 206–211 p.

Gontard, N. 1991. Films et enrobages comestibles: étude amélioration des propriétés filmogènes du gluten., Tese (Dotoract Biochime, Biologie, Cellulaire Etmoleculaire/ Scieens Dês Aliments), Université Des Scieens Et Techniques Du Languedoc, Montpellier. 174p.

Grisi, C. 2008. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Bahia, Brasil.

Henrique, C., M. Cereda. and S. Sarmento. 2008. Características físicas de filmes biodegradáveis produzidos a partir de amidos modificados de mandioca. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, v. 28, n. 1, p. 231-240.

Ke, T., and X. Sun. 2001 . Thermal and mechanical properties of poly(lacti acid) and Starch blends with various plasticizers. *American Society And Agriculture In Engineer*. 44, 945-953 p.

Lima, A., L. Andreani and V. Soldi. 2007. Influência da adição de plastificante e do processo de reticulação na morfologia, absorção de água e propriedades mecânicas de filmes de alginato de sódio. *Química Nova*, V. 30, N. 4. 832-837 p.

- Lourdin, D., L. Coignard, H. Bizot, and P. Colonna. 1997. Influence of equilibrium relative humidity and plasticizer concentration on the water content and glass transition of starch materials. *Polymer : The Chemistry, Physics And Technology Of High Polymer*, London, V.38, N.21. 5401- 5406 p.
- Mano, E. e L. Mendes. 1999. Avaliação das propriedades dos polímeros. In: introdução A polímeros. Editora Edgard Blucher Ltda. São Paulo, Brasil. 58-64 p.
- Mali, S., M.V.E. Grossmann, M.A. García, M.M. Martino, and N.E. Zaritzky. 2004. Barrier, mechanical and optical properties of plasticized yam starch films. *Carbohydrate Polymers*, V.56, 129-135 p.
- Monterrey, E. e P. Sobral. 1999. Caracterização de propriedades mecânicas e óticas de biofilmes a base de proteínas miofibrilares de tilápia do nilo usando uma metodologia de superfície-resposta. *Ciência e tecnologia de alimentos*, V. 19 N.2
- Monterrey-Quintero, E. e P. Sobral. 2000. Preparo e caracterização de proteínas miofibrilares de tilapia-do-nilo para elaboração de biofilmes. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, V.35, N.1. 179-189 p.
- Oliveira, L.M., R. Alves, C. Sarantópoulis, M. Padula, E. Garcia e L. Coltro. 1996. Ensaios para avaliação de embalagens plásticas e flexíveis. Campinas: Centro De Tecnologia De Embalagem/Ital.216p.
- Phan, D.; F. Debeaufort, A. Voilley and D. Luu. 2009. Biopolymer interactions affect the functional properties of edible films based on agar, cassava starch and arabinoxylan blends. *Journal Of Food Engineering*. V. 90, N. 4, 548–558 p.
- Reyes, L. 2013. Caracterización de dispersiones filmogénicas a base de almidón de maíz y ácido oleico en nanoemulsión con capacidad de formación de recubrimientos comestibles activos. Título de Maestro en ciencia y tecnología de alimentos. Santiago de Querétaro. Mexico.
- Robertson, G. 1993. *Food packaging: principles and practice*, marcel dekker.
- Rocha, G. 2009. Obtenção e caracterização de filmes biodegradáveis a partir de misturas de amido de mandioca e extrato protéico de soja. Grau de mestre em ciências no programa de pós-graduação em ciência e tecnologia de alimentos, área de concentração em tecnologia de alimentos. Seropédica, rj. Universidade Federal Rural Do Rio De Janeiro. 2-57 p.
- Santos, P. V. 2004. Elaboração, aditivação e caracterização de biofilmes À base de fécula de mandioca. Tese (Doutorado em Ciência de Alimentos) Faculdade de Engenharia de Alimentos. UNICAMP.
- Sarantópoulos, C., L. Oliveira, M. Padula, L. Coltro, R.Alves e E. Garcia. 2002. Embalagens plásticas flexíveis. Principais polímeros e avaliação de propriedades. 267 p.

Shih, F. 1996. Edible films from rice protein concentrate and pullulan. *Cereal Chemistry*, V.73, N.3, 406-409 p

Shiku, Y., P. Hamaguchi, S. Benjakul, W. Visessanguan and M. Tanaka. 2004. Effect of surimi quality on properties of edible films based on alaska pollack. *Food Chemistry*, V. 86, N. 4. 493–499 p.

Shimazu, A., S. Mali e M. Grossmann. 2007. Efeitos plastificante e antiplastificante do glicerol e do sorbitol em filmes biodegradáveis de amido de mandioca. *Semina: Ciências Agrárias, Londrina*, V. 28, N. 1, 79-88 p.

Silva, L. 2009. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Bahia, Brasil.

S.M.A. 2008. “Norma Ambiental Estatal NAE-SEMADES-007/2008, Criterios y especificaciones técnicas bajo las cuales se deberá realizar la separación, clasificación y valorización de los residuos en el Estado de Jalisco”. Secretaría de Medio Ambiente. Mexico.

Sobral, P., D. Ocuno e H. Savastano. 1998. Preparo de proteínas miofibrilares de carne e elaboração de biofilmes com dois tipos de ácidos: propriedades Mecânicas. *Braz. J. Food Technol.*, V.1, N.1-2. 44-52 p.

Sobral, P. 2000. Influência da espessura de biofilmes feitos à base de proteínas miofibrilares sobre suas propriedades funcionais. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, V. 35, N. 6. 1251-1259 p.

Sobral, P., F. García, A. Habitante e E. Monterreyquintero. 2004. Propriedades de filmes comestíveis produzidos com diferentes concentrações de plastificantes e de proteínas do músculo de tilápia-do-nilo. *Pesq. Agropec. Bras.*, Brasília, V.39, N.3 .255-262 p.

Sobral, P. e D. Ocuno. 2000. Permeabilidade ao vapor de água de biofilmes à base de proteínas miofibrilares de carne. *Braz. J. Food Technol.*, 3:11-16 p.

Souza, C L. Silva, J. Silva, J. Lopez, P. Veiga-Santos, J. Druzian. 2011. *Agric. Food Chem.* 59, 2248.

Soto, J., y M. Candelas. s.f. Isotermas de sorción a diferentes temperaturas para el higo variedad misión. Durango, México.

Thompson, D. 1982. Response surface experimentation. *Journal of food process and preservation*, V.6, P. 155.

Van Soest, J., S. Hulleman, D. de Wit and J. Vliegntbart. 1996. Crystallinity in starch bioplastics. *Ind. Crop. Prod.*, 5, 1 1-22 p.

Veiga-Santos, P. L. Oliveira, M. Cereda, e A. Scamparini. 2007. *Food Chem.* 103, 255

Vicentini, N. 2003. Elaboração e caracterização de filmes comestíveis a base de fécula de mandioca para uso em pós-colheita (Tese De Doutorado) Faculdade De Ciências Agronômicas – Unesp, Botucatu – Sp.

Villada, H., H. Acosta, and R. Velasco. 2007. Biopolymers naturals used in biodegradable packaging. *Temas agrarios* 12(2): 3- 13 p.

Yamashita, F., A. Nakagawa, G. Veiga, S. Mali e M. Grossmann. 2005. Filmes biodegradáveis para aplicação em frutas e hortaliças minimamente processadas. *Braz. J. Food Technol.*, V.8, N.4, 335-343 p.

Yeon-Hum Yun., Young-Ho Na., And Soon-Do Yoon. 2006. Mechanical properties with the functional group of additives for starch/pva blend film. *Journal of polymers and the environment*, 14, 71 – 78 p.

7. ANEXOS

Cuadro 22. Efecto de la combinación de almidón de maíz, yuca, y glicerol en la espesura de los tratamientos a través del tiempo.

TRT	Dia 1	Dia 6	Dia 12
	mm(\pm D.E) [¥]		
1	0.34 \pm 0.01 ^{BAx}	0.33 \pm 0.02 ^{BCDx}	0.34 \pm 0.04 ^{Ax}
2	0.31 \pm 0.02 ^{BDACx}	0.30 \pm 0.03 ^{ECDx}	0.27 \pm 0.04 ^{BDCy}
3	0.33 \pm 0.04 ^{BDACx}	0.35 \pm 0.08 ^{BCx}	0.34 \pm 0.08 ^{Ax}
4	0.26 \pm 0.06 ^{Fx}	0.26 \pm 0.02 ^{Ex}	0.27 \pm 0.02 ^{BDCx}
5	0.277 \pm 0.068 ^{DFx}	0.33 \pm 0.03 ^{BCDyx}	0.3 \pm 0.02 ^{BDACy}
6	0.35 \pm 0.01 ^{Ay}	0.38 \pm 0.02 ^{BAx}	0.35 \pm 0.03 ^{Ay}
7	0.17 \pm 0.02 ^{Gy}	0.25 \pm 0.04 ^{Ex}	0.26 \pm 0.02 ^{DCx}
8	0.23 \pm 0.02 ^{Fz}	0.42 \pm 0.04 ^{Ax}	0.29 \pm 0.07 ^{BDACy}
9	0.30 \pm 0.02 ^{BDACx}	0.27 \pm 0.02 ^{Ey}	0.27 \pm 0.02 ^{BDCy}
10	0.34 \pm 0.03 ^{BACx}	0.34 \pm 0.03 ^{BCDx}	0.33 \pm 0.03 ^{BAx}
11	0.28 \pm 0.02 ^{DFCx}	0.29 \pm 0.04 ^{EDx}	0.29 \pm 0.03 ^{BDACx}
12	0.28 \pm 0.05 ^{BDFCx}	0.28 \pm 0.05 ^{EDx}	0.24 \pm 0.01 ^{Dx}
13	0.25 \pm 0.04 ^{Fy}	0.35 \pm 0.02 ^{BCx}	0.35 \pm 0.02 ^{Ax}
14	0.25 \pm 0.04 ^{Fy}	0.25 \pm 0.04 ^{Ey}	0.32 \pm 0.08 ^{BACx}

Valor seguido por una letra mayúscula A-G (columna) son estadísticamente diferentes P<0.05

Valor seguido por una letra minúscula x-z (fila) son estadísticamente diferentes P<0.05

¥: Media \pm Desviación estándar.

Cuadro 23. Efecto de la combinación de almidón de maíz, yuca, y glicerol en la permeabilidad al vapor de agua de los tratamientos a través del tiempo.

TRT	Dia 1			Dia 6			Dia 12		
	g.mm/m ² .h.kPa(± D.E) ‡								
1	3.14±0.08	^{Bxy}	3.94± 0.08	^{BCx}	2.65±0.01	^{Az}			
2	2.87±0.05	^{BACx}	1.92±0.02	^{Dy}	1.98±0.02	^{CBy}			
3	3.09±0.21	^{BAy}	4.24± 0.22	^{BAX}	2.72±0.04	^{Ay}			
4	2.51±0.14	^{BDACx}	1.41± 0.19	^{Dy}	1.73±0.03	^{CBDy}			
5	2.33±0.20	^{BDCx}	1.72± 0.07	^{Dy}	1.72±0.02	^{CBDy}			
6	3.15±0.35	^{BAy}	4.57± 0.05	^{BAX}	2.75±0.13	^{Ay}			
7	1.48± 0.08	^{Eyx}	1.26± 0.04	^{Dy}	1.60±0.06	^{Cdx}			
8	2.12± 0.18	^{DECy}	5.02± 0.09	^{Ax}	2.03±0.10	^{By}			
9	2.62± 0.23	^{BDACx}	1.31± 0.03	^{Dy}	1.66±0.01	^{CBDy}			
10	3.22± 0.41	^{Ax}	3.31± 0.78	^{Cx}	2.03±0.18	^{Bx}			
11	2.65± 0.26	^{BDACx}	1.43± 0.10	^{Dy}	1.44±0.12	^{Dy}			
12	2.86± 0.19	^{BACx}	1.37±0.02	^{Dy}	2.03±0.16	^{By}			
13	2.06± 0.04	^{DECx}	1.83± 0.03	^{Dx}	1.74±0.13	^{CBDx}			
14	2.00± 0.02	^{DEy}	1.22±0.01	^{Dz}	2.58±0.18	^{Ax}			

Valor seguido por una letra mayúscula A-G (columna) son estadísticamente diferentes P<0.05

Valor seguido por una letra minúscula x-z (fila) son estadísticamente diferentes P<0.05

‡: Media ± Desviación estándar.

Cuadro 24 Efecto de la combinación de almidón de maíz, yuca, y glicerol en solubilidad en agua (25 °C) de los tratamientos a través del tiempo..

TRT	Dia 1			Dia 6			Dia 12		
	%(± D.E) ‡								
1	43.48± 3.73	^{Bx}	43.06±0.88	^{BAX}	43.65±1.28	^{Ex}			
2	62.02± 6.74	^{Ax}	57.04±2.76	^{Ax}	52.62±2.83	^{Cx}			
3	45.30± 2.10	^{Bx}	44.57± 0.08	^{BAX}	43.76±0.95	^{Ex}			
4	52.28± 0.40	^{Bxy}	53.56± 1.24	^{BAy}	63.30±0.59	^{Ax}			
5	44.08± 7.95	^{By}	48.4± 1.02	^{BAXy}	57.31±0.55	^{Bx}			
6	43.04± 8.26	^{Bx}	50.40± 10.16	^{BAX}	44.77±0.47	^{Ex}			
7	53.77± 2.74	^{Bxy}	55.29± 1.37	^{Ay}	65.94±1.44	^{Ax}			
8	43.45± 1.63	^{Bx}	44.67± 1.42	^{BAX}	42.15±1.21	^{Ex}			
9	46.19± 0.55	^{Bz}	50.06± 2.46	^{BAy}	57.65±0.43	^{Bx}			
10	42.96± 2.42	^{Bx}	39.03± 14.73	^{Bx}	57.40±0.39	^{Bx}			
11	47.92± 1.20	^{By}	50.56± 2.91	^{BAX}	59.89±0.61	^{Bx}			
12	53.06± 0.19	^{BAX}	52.18±1.17	^{BAX}	48.09±0.55	^{Dy}			
13	47.94± 0.26	^{By}	50.06± 1.75	^{BAy}	59.21±0.19	^{Bx}			
14	51.91± 0.98	^{BAX}	53.06±0.69	^{BAX}	48.28±0.91	^{Dy}			

Valor seguido por una letra mayúscula A-G (columna) son estadísticamente diferentes P<0.05

Valor seguido por una letra minúscula x-z (fila) son estadísticamente diferentes P<0.05

‡: Media ± Desviación estándar.

Cuadro 25. Efecto de la combinación de almidón de maíz, yuca, y glicerol en la diferencia de color de los tratamientos a través del tiempo.

TRT	Día 1	Día 6	Día 12
1	25.82± 0.57 ^{Ey}	29.54±0.78 ^{Ex}	27.13±0.78 ^{Fy}
2	26.76± 0.44 ^{Ey}	30.64±1.85 ^{DEx}	27.86±0.81 ^{Fxy}
3	43.44± 1.54 ^{Ay}	47.64±1.62 ^{Ax}	43.80±1.80 ^{BAyx}
4	36.70± 2.25 ^{Dx}	39.26±1.05 ^{BCx}	36.23±0.76 ^{DEx}
5	35.60± 0.74 ^{Dx}	35.50±2.14 ^{Cx}	36.72±3.35 ^{DECx}
6	29.73± 1.92 ^{Ey}	35.61±1.94 ^{Cx}	34.85±1.22 ^{Ex}
7	37.45± 2.13 ^{BDCx}	39.69±0.81 ^{BCx}	34.60±4.39 ^{Ex}
8	38.98± 2.89 ^{BDACx}	41.72±3.18 ^{Bx}	41.00±2.12 ^{BDACx}
9	37.09± 1.28 ^{Cx}	35.95±1.31 ^{Cx}	36.73±1.53 ^{DECx}
10	39.24± 2.80 ^{BDACx}	36.36±0.20 ^{Cx}	36.45±1.69 ^{DECx}
11	42.06± 0.56 ^{BACx}	43.28±1.28 ^{BAx}	42.25±1.51 ^{BACx}
12	36.18± 1.20 ^{Dy}	39.50±1.02 ^{BCx}	41.24±0.24 ^{BDACx}
13	35.97± 0.76 ^{Dx}	35.27±1.85 ^{DCx}	38.58±2.03 ^{BDECx}
14	42.13± 1.42 ^{BAx}	42.31±1.39 ^{Bx}	45.15±1.04 ^{Ax}

Valor seguido por una letra mayúscula A-G (columna) son estadísticamente diferentes P<0.05

Valor seguido por una letra minúscula x-z (fila) son estadísticamente diferentes P<0.05

¥: Media ± Desviación estándar.

Cuadro 26 Efecto de la combinación de almidón de maíz, yuca, y glicerol en tensión de los tratamientos a través del tiempo.

TRT	Día 1	Día 6	Día 12
1	0.80±0.28 ^{CDz}	1.09±0.14 ^{EDFy}	1.43±0.20 ^{EDx}
2	2.20±0.48 ^{Ay}	1.47±0.25 ^{EDz}	2.94±0.74 ^{Bx}
3	0.36±0.05 ^{Dy}	0.35±0.09 ^{Gy}	0.70±0.14 ^{Fx}
4	1.49±0.37 ^{By}	2.34±0.27 ^{Bx}	2.38±0.23 ^{Cyx}
5	0.71±0.12 ^{CDy}	1.3±0.41 ^{EDFx}	1.48±0.27 ^{EDx}
6	0.55±0.27 ^{Dy}	1.11±0.34 ^{EDFx}	1.00±0.22 ^{EFx}
7	2.56±0.75 ^{Ay}	4.34±1.02 ^{Ax}	4.36±1.35 ^{Ax}
8	0.53±0.18 ^{Dz}	0.78±0.16 ^{GFy}	0.99±0.11 ^{EFx}
9	1.12± .09 ^{CBx}	1.23±0.34 ^{EDFx}	1.25±0.14 ^{EDFx}
10	0.64±0.16 ^{Dy}	0.73±0.15 ^{GFy}	1.48±0.23 ^{EDx}
11	0.71±0.25 ^{CDy}	1.67±0.38 ^{CDx}	1.86±0.27 ^{CDx}
12	1.12±0.18 ^{CBY}	1.05±0.26 ^{EFy}	1.93±0.47 ^{CDx}
13	1.13±0.15 ^{CBx}	2.17±0.41 ^{Cyx}	2.22±0.18 ^{CBY}
14	0.72±0.14 ^{CDy}	1.31±0.29 ^{EDFx}	1.36±0.36 ^{EDFx}

Valor seguido por una letra mayúscula A-G (columna) son estadísticamente diferentes P<0.05

Valor seguido por una letra minúscula x-z (fila) son estadísticamente diferentes P<0.05

¥: Media ± Desviación estándar.

Cuadro 27 Efecto de la combinación de almidón de maíz, yuca, y glicerol en el módulo de elasticidad de los tratamientos a través del tiempo.

TRT	Día 1	Día 6	Día 12
	MPa(± D.E) [¥]		
1	0.02± 0.00 ^{DCz}	0.04±0.01 ^{Ey}	0.08±0.01 ^{FEx}
2	0.10± 0.02 ^{By}	0.08±0.02 ^{CEdy}	0.28±0.08 ^{Bx}
3	0.01± 0.00 ^{Dy}	0.01±0.00 ^{Ey}	0.03±0.01 ^{Fx}
4	0.11± 0.01 ^{Bz}	0.17±0.03 ^{By}	0.21±0.03 ^{CBx}
5	0.03±0.00 ^{DCy}	0.06±0.03 ^{Edx}	0.07±0.01 ^{FEx}
6	0.02±0.01 ^{DCx}	0.05±0.02 ^{Edy}	0.04±0.01 ^{Fy}
7	0.18± 0.05 ^{Ay}	0.50±0.17 ^{Ax}	0.62±0.22 ^{Ax}
8	0.01± 0.01 ^{Dy}	0.02±0.00 ^{Ex}	0.03±0.01 ^{Fx}
9	0.04± 0.00 ^{Cx}	0.07±0.02 ^{CEdx}	0.07±0.01 ^{FEx}
10	0.03± 0.00 ^{DCy}	0.03±0.01 ^{Ey}	0.12±0.01 ^{CFEDx}
11	0.04± 0.01 ^{Cz}	0.14±0.04 ^{CBy}	0.18±0.01 ^{CBDx}
12	0.04± 0.01 ^{Cy}	0.05±0.01 ^{Edy}	0.14±0.06 ^{CEdx}
13	0.04± 0.01 ^{Cz}	0.12±0.02 ^{CBy}	0.17±0.02 ^{CEdx}
14	0.02± 0.01 ^{DCy}	0.07±0.02 ^{CEdx}	0.08±0.02 ^{FEDx}

Valor seguido por una letra mayúscula A-G (columna) son estadísticamente diferentes P<0.05

Valor seguido por una letra minúscula x-z (fila) son estadísticamente diferentes P<0.05

¥: Media ± Desviación estándar.

Cuadro 28. Efecto de la combinación de almidón de maíz, yuca, y glicerol en la fuerza por perforación de los tratamientos a través del tiempo.

TRT	Día 1	Día 6	Día 12
	N(± D.E) [¥]		
1	4.64±1.47 ^{Ax}	2.78±0.84 ^{CFEDy}	3.72±0.41 ^{FDECyx}
2	5.24±1.20 ^{Ax}	4.63±0.94 ^{Bx}	5.14±2.11 ^{Bxx}
3	1.57±0.26 ^{Edx}	1.43±0.44 ^{Gx}	1.66±1.43 ^{Hx}
4	2.85±0.45 ^{CBdy}	3.28±0.54 ^{CDEy}	4.87±0.80 ^{BACx}
5	2.89±0.29 ^{CBy}	2.53±1.05 ^{GCFDEy}	4.11±0.73 ^{BDECx}
6	1.92±0.58 ^{EDy}	3.66±0.92 ^{CBx}	2.74±0.70 ^{FHEGy}
7	3.53±0.56 ^{By}	6.02±1.55 ^{Ax}	5.92±1.23 ^{Ax}
8	1.51±0.34 ^{Ey}	2.04±0.31 ^{GFx}	1.84±0.43 ^{HBx}
9	2.99±0.39 ^{CBx}	2.92±0.68 ^{CFDEx}	2.93±0.51 ^{FHEGx}
10	2.24±0.36 ^{CEdx}	2.40±0.29 ^{GFDEx}	2.66±0.57 ^{FHGx}
11	2.30±0.31 ^{CEdz}	2.90±0.48 ^{CFDEy}	3.43±0.60 ^{FDEGx}
12	1.53±0.19 ^{Ey}	2.20±0.27 ^{GFEx}	2.49±0.72 ^{FHGx}
13	3.47±0.32 ^{By}	3.61±0.53 ^{CBy}	4.72±0.48 ^{BDACx}
14	2.38±0.21 ^{CEdy}	3.46±0.39 ^{CDx}	2.24±0.57 ^{HGy}

Valor seguido por una letra mayúscula A-G (columna) son estadísticamente diferentes P<0.05

Valor seguido por una letra minúscula x-z (fila) son estadísticamente diferentes P<0.05

¥: Media ± Desviación estándar.

Cuadro 29. Efecto de la combinación de almidón de maíz, yuca, y glicerol en el porcentaje de deformación de los tratamientos a través del tiempo.

TRT	Dia 1	Dia 6	Dia 12
	% (\pm D.E) [¥]		
1	16.6 \pm 17.91 ^{Ax}	4.81 \pm 1.41 ^{Dzyx}	7.18 \pm 1.52 ^{BACy}
2	12.84 \pm 1.61 ^{BAX}	7.82 \pm 1.97 ^{Bxy}	8.29 \pm 2.90 ^{Ay}
3	11.42 \pm 1.12 ^{BACx}	6.34 \pm 1.75 ^{BDCy}	5.11 \pm 1.82 ^{BDCy}
4	4.20 \pm 0.79 ^{Cx}	5.28 \pm 1.77 ^{BDCx}	4.66 \pm 1.45 ^{Dzx}
5	9.56 \pm 1.64 ^{BAXC}	5.82 \pm 2.79 ^{BDCy}	7.70 \pm 1.23 ^{BAyx}
6	4.25 \pm 1.21 ^{Cy}	6.73 \pm 2.14 ^{BDACx}	5.31 \pm 1.84 ^{BDCyx}
7	4.77 \pm 0.99 ^{Cx}	5.49 \pm 2.17 ^{BDCx}	6.09 \pm 2.27 ^{BDACx}
8	8.67 \pm 2.36 ^{BCx}	9.15 \pm 1.91 ^{Ax}	7.19 \pm 1.62 ^{BACx}
9	8.65 \pm 1.12 ^{BCx}	5.59 \pm 1.60 ^{BDCy}	5.36 \pm 1.26 ^{BDCy}
10	8.81 \pm 2.31 ^{BCx}	4.71 \pm 0.91 ^{Dy}	4.85 \pm 1.77 ^{DCy}
11	6.12 \pm 1.70 ^{BCx}	4.71 \pm 1.15 ^{Dyx}	4.29 \pm 1.26 ^{Dy}
12	4.39 \pm 0.79 ^{Cx}	4.36 \pm 1.26 ^{Dx}	4.86 \pm 2.30 ^{Dzx}
13	8.69 \pm 2.01 ^{BCx}	6.26 \pm 1.43 ^{BDCy}	6.54 \pm 1.14 ^{BDACy}
14	8.64 \pm 1.00 ^{BCx}	7.49 \pm 1.66 ^{BACx}	7.08 \pm 1.63 ^{BACx}

Valor seguido por una letra mayúscula A-G (columna) son estadísticamente diferentes P<0.05

Valor seguido por una letra minúscula x-z (fila) son estadísticamente diferentes P<0.05

¥: Media \pm Desviación estándar.



Figura 11. Cortes representativos de los tratamientos uno al nueve.



Figura 12. Cortes representativos de los tratamientos 10 al 14