

**Optimización de revestimientos comestibles a base de proteína de soya, almidón de yuca y plastificantes en manzanas (*Malus domestica*)**

**José Guillermo Henríquez Velasco**

**Zamorano, Honduras**

Noviembre, 2016

ZAMORANO  
CARRERA DE AGROINDUSTRIA ALIMENTARIA

# **Optimización de revestimientos comestibles a base de proteína de soya, almidón de yuca y plastificantes en manzanas (*Malus domestica*)**

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

**José Guillermo Henríquez Velasco**

**Zamorano, Honduras**

Noviembre, 2016

## **Optimización de revestimientos comestibles a base de proteína de soya, almidón de yuca y plastificantes en manzanas (*Malus domestica*)**

**José Guillermo Henríquez Velasco**

**Resumen:** En Latinoamérica las pérdidas en la cadena de distribución de alimentos oscilan en un 15%. Para mitigar estas pérdidas se están investigando nuevos métodos para extender la vida anaquel de los alimentos. En este estudio se desarrolló un revestimiento comestible por el método “casting” tomando como base un 15.2% de proteína concentrada de soya (SPC) y 84.8% de almidón para completar una relación de 1 g de sólidos:10 ml de solución y se evaluaron combinaciones de sorbitol y glicerol como plastificantes para completar un 29.2% con respecto a los sólidos. Los tratamientos se evaluaron con la metodología superficie de respuesta y se evaluaron las propiedades físicas de opacidad, color, solubilidad en agua, espesor, fuerza de perforación, tensión, módulo de elasticidad y permeabilidad a vapor de agua. Se obtuvieron cinco modelos matemáticos tendenciosos y dos predictivos. Estas propiedades resultaron ser óptimas en la combinación de 9.795% de SPC y 100% de sorbitol. Se revistieron manzanas Golden Delicious con el biopolímero óptimo utilizando un brazo robótico y se sometieron a vida anaquel acelerada. Se usó un diseño completamente al azar. Se analizaron los parámetros de pH, firmeza, °Brix y degradación de la superficie mediante el software ImageJ. Las manzanas revestidas mantuvieron mayor porcentaje de superficie sin empardeamiento en el tiempo pero no se encontraron diferencias en el resto de análisis realizados. Se debe realizar más investigaciones para determinar el efecto del revestimiento en manzanas y en otros productos hortofrutícolas.

**Palabras clave:** Biopelículas, brazo robótico, glicerol, hidrocoloides, sorbitol

**Abstract:** Food wasting in Latin America oscillates 15%. In order to reduce the waste of food, scientists are looking for technologies to extend shelf life. The aim of this study was to develop an edible coating by casting method with 15.2% of soy protein concentrate (SPC) and cassava starch to complete 1:10 rate of solids in solution and also were evaluated combinations of sorbitol and glycerol as plastifiers to complete 29.2% in relation to the solids in solution. Surface response methodology was used and their physical, optical and barrier properties were evaluated. Five math regressions with character tendentiousness and two predictive were obtained. With 9.795% of SPC and 100% of sorbitol the optimization of physical, optical and barrier properties was achieved. Golden Delicious apples were coated with the film using a robotic arm and were exposed to accelerated shelf life using a completely randomized desing. Parameters of pH, firmness, Brix and degradation surface were evaluated. For surface degradation was used ImageJ software. Coated apples preserved less proportion of brown surface during the experiment, the other test did not show differences. Further more investigations should determine the effect of the coating in apples and other fruit and vegetable products.

**Key words:** Biofilms, glycerol, hydrocolloids, robotic arm, sorbitol

## CONTENIDO

Portadilla .....	i
Página de firmas .....	ii
Resumen .....	iii
Contenido .....	iv
Índice de cuadros, figuras y anexos.....	v
<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>2. MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>3</b>
<b>3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>10</b>
<b>4. CONCLUSIONES.....</b>	<b>32</b>
<b>5. RECOMENDACIONES .....</b>	<b>33</b>
<b>6. LITERATURA CITADA .....</b>	<b>34</b>
<b>7. ANEXOS.....</b>	<b>37</b>

## ÍNDICE DE CUADROS, FIGURAS Y ANEXOS

Cuadros	Página
1. Formulación de tratamientos con valores codificados y decodificados. ....	8
2. Opacidad a 500 nm de los bioplásticos con las variables de porcentaje de sustitución de almidón de yuca por proteína de soya (AY-PS) y relación de plastificantes. ....	10
3. Coeficientes de regresión y probabilidad (P) de un modelo de regresión polinomial aplicado para opacidad de bioplástico comestible. ....	11
4. Diferencias de color ( $\Delta E$ ) de los bioplásticos con las variables de porcentaje de sustitución de almidón de yuca por proteína de soya (AY-PS) y relación de plastificantes. ....	12
5. Coeficientes de regresión y sus probabilidades (P) para la diferencia de color en revestimientos comestibles. ....	13
6. Solubilidad en agua (%) de los bioplásticos con las variables de porcentaje de sustitución de almidón de yuca por proteína de soya (AY-PS) y relación de plastificantes. ....	14
7. Coeficientes de regresión y sus probabilidades (P) para porcentaje de solubilidad en agua en revestimientos comestibles. ....	14
8. Espesor en milímetros de los recubrimientos con variables de porcentaje de sustitución de almidón de yuca por proteína de soya (AY-PS) y relación de plastificantes. ....	15
9. Coeficientes de regresión y sus probabilidades (P) para espesor en revestimientos comestibles. ....	16
10. Fuerza de perforación en Newtons de bioplásticos con variables de porcentaje de sustitución de almidón de yuca por proteína de soya (AY-PS) y relación de plastificantes. ....	16
11. Coeficientes de regresión y sus probabilidades (P) para Fuerza de perforación en bioplásticos comestibles. ....	17
12. Deformación por perforación (%) de bioplásticos con variables de porcentaje de sustitución de almidón de yuca por proteína de soya (AY-PS) y relación de plastificantes. ....	18
13. Coeficientes de regresión y sus probabilidades (P) para porcentaje de deformación por perforación en bioplásticos comestibles. ....	19
14. Coeficientes de regresión y sus probabilidades (P) de fuerza de tensión en bioplásticos comestibles. ....	20
15. Tensión en Newton de bioplásticos con variables de porcentaje de sustitución de almidón de yuca por proteína de soya (AY-PS) y relación de plastificantes. ....	21

Cuadros	Página
16. Deformación por tensión (%) de bioplásticos con variables de porcentaje de sustitución de almidón de yuca por proteína de soya (AY-PS) y relación de plastificantes.....	21
17. Coeficientes de regresión y sus probabilidades (P) para deformación por tensión bioplásticos.....	22
18. Módulo de elasticidad (MPa) de bioplásticos con variables de porcentaje de sustitución de almidón de yuca por proteína de soya (AY-PS) y relación de plastificantes.....	23
19. Coeficientes de regresión y sus probabilidades (P) para módulo de elasticidad en bioplástico comestible .....	24
20. Permeabilidad a vapor de agua (PVA) en g.mm/h.m <sup>2</sup> .kPa de los bioplásticos con variables de porcentaje de sustitución de almidón de yuca por proteína de soya (A-PS) y relación de plastificantes.....	25
21. Coeficientes de regresión y sus probabilidades (P) para permeabilidad a vapor de agua (PVA = g.mm/h.m <sup>2</sup> .kPa) en bioplásticos comestibles.....	26
22. Firmeza de manzanas Golden delicious revestidas con biopolímero de proteína de soya, almidón de yuca y sorbitol expresada en N.....	30
23. Comparativo de los grados brix de manzanas Golden Delicious recubiertas con biopolímero y sin revestimiento. ....	31
24. Comparativo de pH de manzanas recubiertas con biopolímero y controles. ....	31

Figuras	Página
1. Modelo de brazo robótico LEGO .....	6
2. Ejemplo de “Computer Vision System” utilizado para evaluación de bananos.....	7
3. Modelo octagonal de variables codificadas.....	8
4. Efecto de sustitución (%) de almidón de yuca por proteína de soya (AY-PS) y relación de plastificantes (% hace referencia al glicerol, el resto corresponde a sorbitol) en opacidad de bioplásticos comestibles.....	11
5. Efecto de sustitución (%) de almidón de yuca por proteína de soya (AY-PS) y relación de plastificantes (% hace referencia al glicerol, el resto corresponde a sorbitol) en cambio de color de bioplásticos comestibles. ....	13
6. Efecto de sustitución (%) de almidón de yuca por proteína de soya (AY-PS) y relación de plastificantes (% hace referencia al glicerol, el resto corresponde a sorbitol) en fuerza de perforación en Newton de bioplásticos comestibles.. ....	18
7. Efecto de sustitución (%) de almidón de yuca por proteína de soya (AY-PS) y relación de plastificantes (% hace referencia al glicerol, el resto corresponde a sorbitol) en deformación por perforación (%) de bioplásticos comestibles.....	20
8. Efecto de sustitución (%) de almidón de yuca por proteína de soya (AY-PS) y relación de plastificantes (% hace referencia al glicerol, el resto corresponde a sorbitol) en deformación por tensión de bioplásticos comestibles.....	23

Figuras	Página
9. Efecto de sustitución (%) de almidón de yuca por proteína de soya (AY-PS) y relación de plastificantes (% hace referencia al glicerol, el resto corresponde a sorbitol) en módulo de elasticidad (MPa) de bioplásticos comestibles.....	24
10. Efecto de sustitución (%) de almidón de yuca por proteína de soya (AY-PS) y relación de plastificantes (% hace referencia al glicerol, el resto corresponde a sorbitol) en permeabilidad a vapor de agua (PVA) de bioplásticos comestibles. ....	26
11. Valores óptimos de las variables independientes sobre las propiedades ópticas, físicas y de barrera de un biopolímero con sustitución de almidón de yuca por proteína de soya y relación de plastificantes glicerol y sorbitol, mostrando la proporción de glicerol.....	27
12. Degradación en el tiempo de la superficie en buen estado (% SBE) de manzanas revestidas con biopolímero de proteína de soya, almidón de yuca y sorbitol comparado con manzanas sin revestimiento en vida anaquel acelerada. ....	28
13. Comportamiento en el tiempo de la degradación de la superficie de manzanas revestidas con biopolímero de proteína de soya, almidón de yuca y sorbitol como plastificante en vida anaquel acelerada. ....	29
14. Efecto en la pérdida de peso de manzanas Golden delicious revestidas con biopolímero de proteína de soya, almidón de yuca y sorbitol como plastificante en condiciones aceleradas.....	30

Anexos	Página
1. Diseño de acople para análisis de perforación en texturómetro .....	37
2. Secuencia utilizada en la programación de brazo robótico Lego Mindstorm .....	37
3. Diseño de acople para brazo robótico elaborado en AUTOCAD® 2016.....	38
4. Binarización de imágenes para posterior análisis de superficie con software ImageJ.....	38
5. Porcentaje de superficie en buen estado de manzanas Golden Delicious revestidas con biopolímero de proteína de soya, almidón de yuca y sorbitol en vida anaquel acelerada.....	39
6. Pérdida de peso (%) en el tiempo en manzanas recubiertas con biopolímero hecho de proteína de soya, almidón de yuca y sorbitol en vida anaquel acelerada. ....	39

# 1. INTRODUCCIÓN

Latinoamérica desperdicia aproximadamente 127 millones de toneladas de alimentos por año (FAO 2016). Las pérdidas que se experimentan durante la cadena de distribución rondan el 15% (FAO 2014). Para mitigar estas pérdidas se han investigado y desarrollado diversos métodos de conservación de los alimentos entre los cuales se encuentran tratamientos térmicos, refrigeración, fermentación y procesos tan simples pero importantes para protegerlos de daños. Los empaques utilizados para la gran diversidad de productos existentes juegan un papel fundamental en la conservación de alimentos. Sin embargo, el uso de empaques no amigables con el ambiente genera acumulación de los mismos lo que obliga a la búsqueda de biopolímeros naturales (Villada *et al.* 2007). Estos polímeros están siendo estudiados desde hace varios años. Con este estudio se pretendió crear una matriz que pueda ser utilizada como cobertura alimenticia que permita extender la vida anaquel de frutas y vegetales, en este caso de manzanas.

El uso de revestimientos comestibles representa una oportunidad para extender la vida anaquel de las frutas y vegetales sin contaminar el medio ambiente. Este tipo de empaques se consideran medios para crear una atmósfera modificada activa. Estos empaques son polímeros que están constituidos por polisacáridos (almidones, celulosa, alginatos, carrageninas y pectina), proteínas (gelatinas, derivadas del suero de la leche, gluten, caseínas y derivadas de huevo), lípidos (mono glicéridos, ácidos grasos y ésteres de ácidos grasos) y otros componentes como plastificantes, entre ellos glicerol y sorbitol (Cuq *et al.* 1995).

Los polímeros hidrocoidales que contienen grupos OH (hidroxilos), estos son ampliamente utilizados para gelificar ya que generalmente son solubles en agua. De manera general los hidrocoides ofrecen control ante la tasa de transferencia de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> además de sus brindar buenas propiedades mecánicas. La desventaja de este tipo de recubrimientos es su permeabilidad a humedad. Las materias primas para este tipo de revestimientos se detallan más adelante basados en la Ficha N° 7 de Tecnologías para la Industria Alimentaria (Parzanese 2006).

Los almidones brindan revestimientos opacos. Los alginatos provientes de algas forman geles al adicionar iones de calcio (Ca<sup>2++</sup>). Las pectinas están compuestas por un complejo grupo de polisacáridos mayormente estructurales y que requieren de sales de calcio y de plastificantes para formar películas. Derivados de la celulosa que por su estructura lineal se consideran óptimos para formar películas sólidas y resistentes a aceites y a solventes orgánicos no polares. Las proteínas son ampliamente utilizadas. La Caseína es conocida por su capacidad anfifílica, su desorden y la formación de enlaces H que la convierte en muy buena formadora de películas de emulsión. Estas películas son transparentes y muy

flexibles. Las proteínas del suero lácteo brindan excelentes barreras al O<sub>2</sub> pero su gran desventaja es que sus propiedades mecánicas son muy frágiles. Este defecto puede ser solventado con la adición de plastificantes, entre los más usados están el glicerol y sorbitol (Ozdemir y Floros 2008). Colágeno que se encuentra en la piel, tendones y tejido conectivo y en las proteínas fibrosas de animales. Los compuestos lipídicos son de carácter hidrofóbico y su grado polimérico es muy bajo. Este tipo de revestimientos abarca ceras, resinas, ácidos grasos, mono y diglicéridos. Ofrece excelentes propiedades de barrera a humedad. Algunos de los usos más comunes son en frutas para protegerlas y en el caso de las que no son digeribles se remueven con lavado. También se usan en la confitería como brillo. Los bioplásticos compuestos son la combinación de los hidrocoloidales y los lipídicos. Las emulsiones son las mezclas heterogéneas ya sea por emulsión o por microemulsión. La desventaja es que no se obtiene una uniformidad de propiedades de barrera en este tipo de revestimientos. Existen diversos métodos para aplicar los biopolímeros y estos se clasifican según el tipo de uso. Cuando se elabora una película comestible preformada se utiliza el método “casting”, también llamado vaciado en placa. Para la elaboración de revestimientos comestibles se utiliza la inmersión o spray. Inmersión consiste en sumergir el alimento, generalmente de geometría irregular en la matriz y el spray consiste en aplicar la matriz presurizada sobre el alimento (Parzanese 2006).

Investigadores están probando diferentes materias primas para la elaboración de revestimientos comestibles. El área de frutas y vegetales es una de las más interesadas en este tipo de empaques particularmente en sus propiedades físicas que permitan extender la vida anaquel de frutas y vegetales modificando la atmósfera interna de la fruta (Rojas-Graü *et al.* 2009). Se han realizado estudios en uvas (Fakhouri *et al.* 2007), alcachofas (Ghidelli *et al.* 2015), fresa, arándano y feijoa (Moncayo 2013), y en manzanas (Villada *et al.* 2007; Ochoa *et al.* 2009; Quintero *et al.* 2010). En el caso de las manzanas se busca extender su vida anaquel controlando su tasa de respiración e intercambio de agua con el ambiente (Lima *et al.* 2010). La temperatura principalmente afecta su tasa de respiración, síntesis de etileno, pudriciones, alteraciones fisiológicas y pérdida de peso. Una manzana que ha perdido el 7% de su peso inicial deja de ser comercializable por su apariencia, esto se debe a su transpiración (Moggia y Pereira 2007).

El presente estudio tuvo como objetivo optimizar un biopolímero elaborado a partir de proteína concentrada de soya, almidón de yuca, sorbitol y glicerol para ver su efecto en la vida anaquel de manzanas utilizando un brazo robótico para su aplicación. Se plantearon los siguientes objetivos:

- Optimizar un revestimiento hecho a base de proteína de soya, almidón de yuca, glicerol y sorbitol de acuerdo a sus propiedades ópticas, mecánicas y de barrera.
- Generar modelos matemáticos para predecir el comportamiento de revestimientos hechos de proteína de soya, almidón de yuca, glicerol y sorbitol.
- Determinar el efecto de un revestimiento hecho a base de proteína de soya, almidón de yuca, glicerol y sorbitol en la vida anaquel de manzanas.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se dividió en dos etapas. En la primera etapa se elaboraron revestimientos por el método casting, estos serán nombrados bioplásticos y fueron caracterizados físicamente para obtener un óptimo que se utilizó en la segunda etapa del estudio. Para la elaboración de los revestimientos se utilizaron como materias primas proteína concentrada soya RENDMIL natural B553 con pureza mayor al 63% proporcionada por DIMEX en Honduras, almidón de yuca que se adquirió en ASEAL de Honduras, glicerol y sorbitol con una pureza de 99% de Sigma Aldrich. En la segunda etapa se aplicó la cobertura a las manzanas que fueron adquiridas en un supermercado y se midió superficie de degradación a las mismas por análisis físicos.

**Formulación de bioplásticos (soluciones filmogénicas).** Las soluciones se elaboraron con proteína aislada de soya en solución al 15.20%, como plastificantes se utilizaron 50% de sorbitol y 50% de glicerol para completar un 29.2% en relación a los sólidos totales de la cobertura (Rocha *et al.* 2014) y se utilizó un 84.8% de almidón. Estas proporciones fueron los puntos centrales que se utilizaron para el diseño experimental que se detalla más adelante. La relación sólidos-agua fue de 1 g de sólidos: 10 ml de agua destilada. La solución se ajustó a pH de 7 (Anker *et al.* 1999).

**Elaboración de los bioplásticos.** Se diluyeron el sorbitol y la proteína en 100 ml de agua destilada a temperatura ambiente y con agitación 5. Lo mismo se hizo con el almidón en 200 ml de agua hasta su completa dilución. Se añadió el glicerol a la dilución de almidón. Se ajustó el pH de ambas soluciones a  $7 \pm 0.25$  con NaOH al 5% (dilución de 10 ml de NaOH al 50% en 90 ml de agua destilada). La proteína + sorbitol se mantuvieron en agitación constante en un plato de calentamiento hasta alcanzar 90 °C y se mantuvieron a esa temperatura durante 5 minutos. Después esta solución se retiró de la fuente de calentamiento pero se mantuvo en agitación constante. Inmediatamente se calentó y se agitó la solución de los almidones + glicerol. Cuando la proteína + sorbitol alcanzaron los 70 °C se mezclaron con la solución que contenía los almidones. Al iniciar la gelatinización de los almidones se quitó la solución del plato de calentamiento. Se vaciaron  $25 \pm 0.5$  g de solución en platos petri de plástico de 144 mm de diámetro. Los filmes se secaron en una cámara de ambiente controlado a  $36 \pm 2$  °C y 50% de humedad relativa durante 30 horas.

**Caracterización de bioplásticos.** En la primera etapa las coberturas fueron elaboradas por el método casting y se les realizaron análisis ópticos (color y opacidad), mecánicos (perforación y elongación) y de barrera (permeabilidad a vapor de agua).

## Análisis ópticos.

**Color.** Se evaluó el color de las coberturas utilizando el Colorflex Hunterlab® en el espacio de color L\*, a\* y b\*. Este espacio se caracterizó de la siguiente manera:

L\* = Luminosidad (0: negro y 100: blanco)

a\* = -80 a 0: verde y 0 a 100: rojo)

b\* = -100 a 0: azul y 0 a 70: amarillo

Para encontrar la diferencia en estas mediciones se usó la ecuación 1 que corresponde a la diferencia de color en el espacio CIE L\* a\* b\*. Este análisis se realizó por quintuplicado.

$$\Delta E_{lab} (\text{diferencia total de color}) = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2} \quad [1]$$

**Opacidad.** Se utilizó un espectrofotómetro con longitud de onda de 500 nm para las películas y la absorbancia obtenida se reemplazó en la ecuación 2 para obtener la opacidad.

$$\text{Opacidad} = \frac{A_{500}}{T} \quad [2]$$

Donde:

A<sub>500</sub> = Absorbancia a 500 nm

T = Espesor en milímetros de la película.

**Propiedades mecánicas.** Este análisis incluyó las evaluaciones de perforación (fuerza de perforación y porcentaje de deformación) y elongación (tensión, deformación por elongación y módulo de elasticidad o módulo de Young). Para esto se utilizó el texturómetro Brookfield CT3. En ambos casos se realizaron 10 pruebas a cada una de las muestras.

**Perforación.** Consiste en determinar la fuerza y la distancia que requiere un material para romperse. Se cortaron muestras de 30 mm de longitud y 27 mm de ancho (Muñoz 2014), estas fueron colocadas en un soporte diseñado para este propósito basado en especificaciones del fabricante del texturómetro ya mencionado. Al texturómetro se le acopló una sonda de 3 mm de diámetro y la velocidad fue de 0.1 cm/s. Para la estimación de la deformación por perforación se utilizó la ecuación 3.

$$\text{Deformación } (h) = \left( \frac{\sqrt{b^2 + a^2}}{40} \right) \times 100 \quad [3]$$

Donde:

a = Radio de la muestra

b = profundidad de estiramiento previo a rotura

**Elongación.** Este análisis se fundamenta en tres propiedades: tensión, deformación y módulo de elasticidad (Vicentini 2003) y está basado en la norma ASTM D 828-95<sup>a</sup> (ASTM 1995). Se cortaron muestras de 70 mm de longitud y 15 mm de ancho y el texturómetro se calibró con velocidad de 0.1 cm/s. La distancia inicial entre las mordazas fue de 40 mm. La tensión de rotura se determinó con la ecuación 4 (Farias *et al.* 2012).

$$\text{Deformación lineal} = (l - l_0)/l_0 \quad [4]$$

Donde:

$l$  = Longitud final

$l_0$  = Longitud inicial

### Propiedades de barrera.

**Permeabilidad a vapor de agua (PVA).** Este análisis se realizó gravimétricamente basado en el método E96-92 de la ASTM modificado, el cual establece que se deben utilizar disecadores de sulfato de calcio anhídrido a una temperatura de  $25 \pm 3$  °C. Las muestras se cortaron en círculos de diámetro de 25 mm para tapar vasos volumétricos con  $30 \pm 2.5$  g (25 °C) de agua destilada. Los vasos se pesaron cada 24 horas durante 9 días (Muñoz 2014). La PVA fue calculada con la ecuación 5.

$$PVA = \left( \frac{g}{t \times A} \right) \times \frac{x}{\Delta P} \quad [5]$$

Donde:

$g$  = pérdida de peso del vaso volumétrico

$t$  = tiempo en horas

$A$  = área de permeabilidad

$x$  = espesor de la película

$\Delta P$  = diferencia de presiones entre el sulfato de calcio (0 kPa a 25 °C) y el vapor de agua pura (3.167 kPa, a 25 °C)

**Solubilidad en agua.** Se siguió la metodología propuesta por Gontard (1992) modificada. Se cortaron dos círculos con diámetro de 25 mm y se pesaron. Uno de ellos fue secado por 24 horas a  $105 \pm 2$  °C y se pesó después de ese tiempo. El otro círculo se puso en un tubo de ensayo con 50 ml de agua destilada durante 24 h a 25 °C y fue agitado suavemente cada 3 horas. Para obtener la solubilidad se secó este círculo de bioplástico durante 24 horas a  $105 \pm 2$  °C y se pesó. Los pesos se sustituyeron en la ecuación 6 para obtener el porcentaje de solubilidad. El análisis se realizó por triplicado.

$$\% \text{ Solubilidad} = \left( \frac{P_i - P_f}{P_i} \right) * 100 \quad [6]$$

Donde:

$P_i$  = peso inicial

$P_f$  = peso final

**Espesor.** Se utilizó un micrómetro marca Mitutoyo MDC-1 con precisión de 0.0001 mm. El espesor se determinó aleatoriamente en 10 puntos de la muestra (Mali *et al.* 2008).

**Revestimiento de las manzanas.** A partir de ahora el bioplástico se denominará revestimiento por su forma de elaboración. Se utilizaron manzanas de la variedad Golden delicious que fueron adquiridas en un supermercado de Tegucigalpa las cuales fueron almacenadas a 4 °C. Se revistieron 15 manzanas con el biopolímero obtenido de la optimización y otras 15 manzanas. Las manzanas fueron utilizadas como control sin revestimiento. Para lograr el revestimiento de las manzanas se utilizó un brazo robótico que fue construido a partir de un set de LEGO Mindstorm EV3, se utilizó el modelo propuesto por el fabricante para la construcción del mismo (Figura 1). El brazo fue programado con el Software LEGO MINDSTORMS EV3 Home Edition proporcionado por el fabricante. Al brazo se le acopló en su extremo un sujetador para que pudiera sostener las manzanas que fueron recubiertas. El acople fue diseñado en AUTOCAD 2016 e impreso con la impresora 3D MAKERBOT REPLICATOR+ de 5ª generación. La formulación del revestimiento fue la que se obtuvo de la optimización realizada en la primera fase del estudio.

El procedimiento para la elaboración del revestimiento fue igual al de la primera etapa. Se mantuvo la solución filmogénica a 50 °C usando un termobañó mientras las manzanas se sumergían con el brazo robótico. Las manzanas permanecieron sumergidas durante 3 segundos y luego fueron colgadas con ganchos metálicos por su pedúnculo. Las manzanas revestidas se dejaron durante 24 horas a temperatura ambiente para que el revestimiento se secase.



Figura 1. Modelo de brazo robótico LEGO

Fuente: <http://www.electricbricks.com/>

**Medición de degradación en manzanas revestidas.** Se aceleró la vida anaquel de las manzanas con una cámara de ambiente controlado NorLake Scientific. Se mantuvieron las manzanas a 50 °C y 60% HR ya que las manzanas poseen un Q10 de 2.5 (Moggia y Pereira 2007) con lo cual se estimó se aceleraría el tiempo de degradación en 3 veces. Se fotografiaron las manzanas con una estructura similar a un “Computer Vision System” (CVS) modificado, la cual estaba compuesta por dos lámparas fluorescentes Philips D65 (con balastos electrónicos) colocadas a 45° de la muestra y la cámara fotográfica marca Sony DSC-WX80 sin zoom y sin flash; el diseño del CVS se especifica en la figura 2. Las fotografías fueron obtenidas a las 0, 20, 23, 28, 34, 50, 75 y 100 horas.

Adicional al seguimiento con el CVS, se realizaron análisis de pH con el método AOAC 981.12, pérdida de peso y °Brix con el método AOAC 983.17 y firmeza de las manzanas con la metodología utilizada por Bourles y colaboradores (2009) con modificaciones, se utilizó una sonda cilíndrica con punta plana de 4 mm de diámetro y una velocidad de 1 mm/s.



Figura 2. Ejemplo de “Computer Vision System” utilizado para evaluación de bananos.  
Fuente: (Mendoza y Aguilera 2004)

**Degradación superficial de las manzanas.** Se utilizaron las fotografías y software de procesamiento de imágenes de código abierto ImageJ. Las imágenes fueron binarizadas y se cuantificó el área de las manchas por empardeamiento en relación al área total de la superficie fotografiada de la manzana con el método establecido por Mendoza y Aguilera (2004) modificado, la binarización se realizó en el espacio de color L a b. Se modificó únicamente el valor de a (verde – rojo) que va en la escala de 0 a 255, estableciéndose que aquellos valores mayores a 114 y que tuvieran más de 1 mm<sup>2</sup> de área serían considerados como manchas de empardeamiento.

**Diseño experimental.** En la primera etapa se utilizó la metodología Superficie de Respuesta con un Diseño Compuesto Central Rotacional para optimización en la cual se utilizaron dos variables independientes: % proteína concentrada de soya (variable  $X_1$ ) y % relación de plastificante (variable  $X_2$ ). Estas variables fueron codificadas para crear el modelo octogonal (figura 3) con 4 puntos factoriales, 4 puntos axiales y 4 repeticiones de un punto central que fueron comparadas con el control que fue establecido en la formulación de la cobertura (Ítem 2.3.1). Resultaron un total de 14 tratamientos los cuales se detallan en el Cuadro 1. El porcentaje que se muestra en los tratamientos corresponde al glicerol y la fracción restante para completar la proporción de plastificante fue sorbitol.

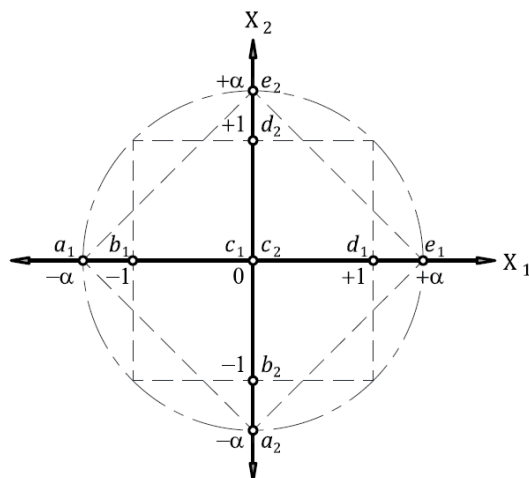


Figura 3. Modelo octogonal de variables codificadas.

Cuadro 1. Formulación de tratamientos con valores codificados y decodificados.

Tratamiento	Valores codificados		Valores reales	
	$X_1$	$X_2$	% Proteína soya	% Relación de plastificantes*
1	-1.00	-1.00	8.83	14.64
2	-1.00	1.00	8.83	85.36
3	1.00	-1.00	21.57	14.64
4	1.00	1.00	21.57	85.36
5	-1.41	0.00	6.19	50.00
6	1.41	0.00	24.21	50.00
7	0.00	-1.41	15.20	00.00
8	0.00	1.41	15.20	100.00
9 (C)	0.00	0.00	15.20	50.00
10 (C)	0.00	0.00	15.20	50.00
11 (C)	0.00	0.00	15.20	50.00
12 (C)	0.00	0.00	15.20	50.00

\* Hace referencia a la proporción de glicerol como plastificante y el restante es sorbitol.  
(C) Puntos centrales

**Análisis estadístico.** Se realizó un análisis de varianza con un nivel de significancia de  $P < 0.05$ . Las variables independientes codificadas se analizaron en el software Statistica 7.0, del cual se obtuvieron los coeficientes de regresión y se generaron los modelos matemáticos para elaborar superficies de respuesta. Los modelos se clasificaron como predictivos sólo si su ajuste de modelo era mayor a 0.6, de lo contrario se les clasificó como tendenciosos; la falta de ajuste del modelo no debía ser significativa ( $P < 0.05$ ) y que el F calculado debería ser mayor que el F tabular (Rocha 2009).

Para la segunda etapa se utilizó un diseño completamente al azar con medidas repetidas en el tiempo. A los resultados se les realizó un análisis de varianza y una separación de medias Duncan con una probabilidad del 95%.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

**Opacidad.** Se encontraron valores entre 4.14 y 6.63. El tratamiento que presentó menor opacidad corresponde a un 15.20% de proteína de soya y 100% de sorbitol como plastificante, este corresponde a uno de los tratamientos axiales. El tratamiento con mayor opacidad es el que tiene un 21.57% de proteína de soya y un 14.64% de glicerol siendo este un tratamiento factorial en el modelo (Cuadro 2).

Cuadro 2. Opacidad a 500 nm de los bioplásticos con las variables de porcentaje de sustitución de almidón de yuca por proteína de soya (AY-PS) y relación de plastificantes.

Tratamiento	% Sustitución AY-PS	% Relación de plastificantes <sup>€</sup>	Opacidad $\pm$ DE <sup>€</sup>
T1	8.830	14.640	6.05 $\pm$ 0.57
T2	8.830	85.360	6.09 $\pm$ 0.62
T3	21.570	14.640	6.63 $\pm$ 1.11
T4	21.570	85.360	5.65 $\pm$ 0.71
T5	6.192	50.000	5.50 $\pm$ 1.08
T6	24.207	50.000	5.19 $\pm$ 1.06
T7	15.200	0.000	4.14 $\pm$ 0.69
T8	15.200	100.000	5.94 $\pm$ 0.84
T9	15.200	50.000	4.48 $\pm$ 0.65
T10	15.200	50.000	5.05 $\pm$ 1.00
T11	15.200	50.000	4.85 $\pm$ 0.67
T12	15.200	50.000	5.00 $\pm$ 0.57
<b>%Coeficiente de Variación</b>			<b>15.31</b>

<sup>€</sup>Hace referencia a la proporción de glicerol como plastificante, el restante es sorbitol.

<sup>¥</sup>Media  $\pm$  desviación estándar

Los coeficientes de regresión muestran efectos positivos de las variables proteína de soya y glicerol en sus niveles cuadráticos (Cuadro 3). El ajuste del modelo es de 66% con falta de ajuste significativa ( $P < 0.05$ ). En el caso de las manzanas es deseable que el recubrimiento sea lo menos opaco posible. Esta opacidad se debe a la morfología estructural del recubrimiento, mientras más amorfo, es más transparente y a mayor cristalinidad es más opaco (Crippa *et al.* 2007). La ecuación polinomial 7 fue generada con las variables independientes significativas a  $P < 0.05$  y se considera de tendenciosa porque su falta de ajuste fue significativa y su F calculado fue menor que el F tabular (Rocha 2009). Este comportamiento se observa en la Figura 4 generada a partir de la ecuación 7. Estos resultados coinciden con Cao y colaboradores (2007) que evaluaron gelatina y proteína de

soya, teniendo como resultado que a mayor proporción de proteína se obtiene mayor opacidad. Muñoz (2014), encontró que con mayor cantidad de glicerol el bioplástico es menos opaco. Según los resultados del presente estudio, a menor cantidad de proteína y más sorbitol los bioplásticos son más transparentes. La opacidad se ve afectada por otros factores como los lípidos y los minerales que contienen las materias primas que se utilizan (Fakhouri *et al.* 2007)

Cuadro 3. Coeficientes de regresión y probabilidad (P) de un modelo de regresión polinomial aplicado para opacidad de bioplástico comestible.

Variable	Coefficiente	P
Intercepto	4.84E+00	4.14E-05
X <sub>1</sub>	-3.73E-02	7.10E-01 <sup>ns</sup>
X <sub>1</sub> <sup>2</sup>	4.78E-01	1.83E-02*
X <sub>2</sub>	2.01E-01	1.15E-01 <sup>ns</sup>
X <sub>2</sub> <sup>2</sup>	3.26E-01	4.95E-02*
X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	-2.55E-01	1.42E-01 <sup>ns</sup>
Falta de ajuste		0.023*
R <sup>2</sup>		0.66
F. Calculado		0.51
F. Tabular		6.94

X<sub>1</sub>: % proteína de soya

X<sub>2</sub>: % relación de plastificantes

\*Significativo a P<0.05

<sup>ns</sup>No significativo

$$\text{Opacidad} = 4.844862 + 0.478312X_1^2 + 0.325766X_2^2 \quad [7]$$

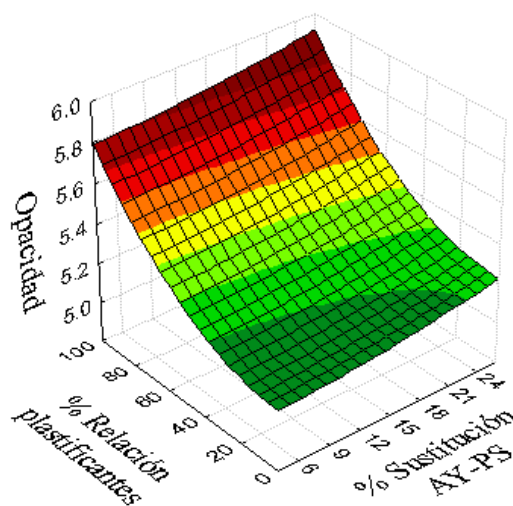


Figura 4. Efecto de sustitución (%) de almidón de yuca por proteína de soya (AY-PS) y relación de plastificantes (% hace referencia al glicerol, el resto corresponde a sorbitol) en opacidad de bioplásticos comestibles.

**Color.** Se encontraron diferencias de color entre 0.20 y 9.9. El tratamiento con menor diferencia de color (0.26) fue el tratamiento que tenía menos proteína que fue un tratamiento axial. El tratamiento con mayor cambio de color (9.77) fue el tratamiento con 21.570% de proteína de soya y 85.36% de glicerol en la relación de plastificantes (Cuadro 4).

Cuadro 4. Diferencias de color ( $\Delta E$ ) de los bioplásticos con las variables de porcentaje de sustitución de almidón de yuca por proteína de soya (AY-PS) y relación de plastificantes.

<b>Tratamiento</b>	<b>% Sustitución AY-PS</b>	<b>% Relación de plastificantes<sup>€</sup></b>	<b><math>\Delta E \pm DE^{\text{¥}}</math></b>
T1	8.830	14.640	2.08 $\pm$ 0.14
T2	8.830	85.360	8.61 $\pm$ 0.16
T3	21.570	14.640	7.46 $\pm$ 0.06
T4	21.570	85.360	9.77 $\pm$ 0.13
T5	6.192	50.000	0.26 $\pm$ 0.06
T6	24.207	50.000	7.91 $\pm$ 0.07
T7	15.200	0.000	7.87 $\pm$ 0.13
T8	15.200	100.000	4.03 $\pm$ 0.04
T9	15.200	50.000	9.21 $\pm$ 0.31
T10	15.200	50.000	9.08 $\pm$ 0.14
T11	15.200	50.000	8.83 $\pm$ 0.07
T12	15.200	50.000	8.40 $\pm$ 0.15
<b>% Coeficiente de Variación</b>			<b>2.02</b>

<sup>€</sup>Hace referencia a la proporción de glicerol como plastificante, el restante es sorbitol.

<sup>¥</sup>Media  $\pm$  desviación estándar

Este resultado coincide con los obtenidos por Rocha (2009) quién encontró que la diferencia en color se debe a la coloración de la proteína utilizada. Chariguaman (2015), encontró un comportamiento similar con harina de maracuyá donde al disminuir la concentración de almidones los cambios son significativos. El modelo presentó un ajuste del 66% por lo cual se considera predictivo.

Con los coeficientes obtenidos se generó la ecuación 8 considerando todas las variables tanto en niveles lineales como cuadráticos por su  $P < 0.05$  (Cuadro 5). De la ecuación 8 se generó la figura 5 donde se observa el comportamiento de las variables. Se encontró diferencia de color decreciente al disminuir ambas variables. En revestimientos para manzanas se quiere que tenga el menor cambio de color posible porque el color es uno de los factores determinantes para que los consumidores seleccionen las manzanas a la hora de la compra (Moggia y Pereira 2007)

Cuadro 5. Coeficientes de regresión y sus probabilidades (P) para la diferencia de color en revestimientos comestibles.

Variable	Coefficiente	P
Intercepto	8.88E+00	1.80E-05
X <sub>1</sub>	2.16E+00	4.41E-04*
X <sub>1</sub> <sup>2</sup>	-1.90E+00	9.04E-04*
X <sub>2</sub>	4.29E-01	4.30E-02*
X <sub>2</sub> <sup>2</sup>	-9.78E-01	6.26E-03*
X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	-1.06E+00	9.81E-03*
Falta de ajuste		0.002*
R <sup>2</sup>		0.66
F. Calculado		224.96
F. Tabular		4.39

X<sub>1</sub>: % proteína de soya

X<sub>2</sub>: % relación de plastificantes

\*Significativo a P<0.05

<sup>ns</sup>No significativo

$$\Delta E = 8.876 + 2.161X_1 - 1.897X_1^2 + 0.429X_2 - 0.978X_2^2 - 1.055 X_1X_2 \quad [8]$$

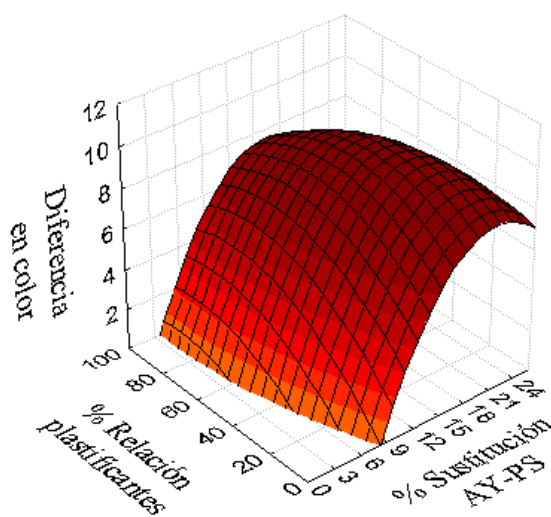


Figura 5. Efecto de sustitución (%) de almidón de yuca por proteína de soya (AY-PS) y relación de plastificantes (% hace referencia al glicerol, el resto corresponde a sorbitol) en cambio de color de bioplásticos comestibles.

**Solubilidad en agua.** Se encontró que a mayor porcentaje de proteína de soya y menor proporción de glicerol como plastificante, la solubilidad en agua es mayor. El mayor porcentaje de solubilidad (53.43%) corresponde al tratamiento con 21.57% de proteína y 14.64% de glicerol como plastificante (Cuadro 6).

Cuadro 6. Solubilidad en agua (%) de los bioplásticos con las variables de porcentaje de sustitución de almidón de yuca por proteína de soya (AY-PS) y relación de plastificantes.

Tratamiento	% Sustitución AY-PS	% Relación de plastificantes <sup>€</sup>	Solubilidad en agua ± DE <sup>¥</sup>
T1	8.830	14.640	40.23 ± 10.03
T2	8.830	85.360	27.14 ± 22.22
T3	21.570	14.640	53.43 ± 15.47
T4	21.570	85.360	29.08 ± 17.25
T5	6.192	50.000	42.14 ± 4.04
T6	24.207	50.000	43.77 ± 11.2
T7	15.200	0.000	40.66 ± 4.05
T8	15.200	100.000	52.81 ± 5.93
T9	15.200	50.000	46.81 ± 5.42
T10	15.200	50.000	38.07 ± 18.82
T11	15.200	50.000	20.43 ± 13.49
T12	15.200	50.000	42.14 ± 9.43
<b>% Coeficiente de Variación</b>			<b>32.33</b>

<sup>€</sup>Hace referencia a la proporción de glicerol como plastificante, el restante es sorbitol.

<sup>¥</sup>Media ± desviación estándar

Cuadro 7. Coeficientes de regresión y sus probabilidades (P) para porcentaje de solubilidad en agua en revestimientos comestibles.

Variable	Coefficiente	P
Intercepto	3.74E+01	7.64E-03
X <sub>1</sub>	2.55E+00	5.81E-01 <sup>ns</sup>
X <sub>1</sub> <sup>2</sup>	1.18E+00	8.14E-01 <sup>ns</sup>
X <sub>2</sub>	-2.00E+00	6.60E-01 <sup>ns</sup>
X <sub>2</sub> <sup>2</sup>	2.68E+00	6.02E-01 <sup>ns</sup>
X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	-2.35E+00	7.14E-01 <sup>ns</sup>
Falta de ajuste		0.455 <sup>ns</sup>
R <sup>2</sup>		0.15

X<sub>1</sub>: % proteína de soya

X<sub>2</sub>: % relación de plastificantes

\*Significativo a P<0.05

<sup>ns</sup>No significativo

Los coeficientes para solubilidad en agua tuvieron un ajuste de 15% y la significancia de las variables no permitió crear ningún modelo matemático para esta variable dependiente (Cuadro 7). Estudios con gelatina en lugar de proteína de soya en proporciones similares si fueron capaces de encontrar efectos de la gelatina en la solubilidad en agua (Fakhouri *et al.* 2007). Rocha y colaboradores (2014), encontraron que a mayor proporción de plastificante en la matriz, en ese caso glicerol, la solubilidad aumenta al incrementar la proteína de soya. Otro de los efectos observados en ese mismo estudio fue que la solubilidad de la proteína

de soya fue mayor a pH alcalinos. La solubilidad de la proteína de soya es menor a pH cercanos a su punto isoelectrico (4.0 – 5.5)(Serrano 2015). Para el presente estudio, el pH se decidió por la ficha técnica de la proteína de soya utilizada indicando que la mayor solubilidad de la proteína en agua era a pH neutro.

**Espesor.** Se encontraron valores entre los 0.115 y los 0.212 mm. El tratamiento con mayor grosor fue el que contenía 15.2% de proteína de soya y un 50% de glicerol como plastificante. Estos valores corresponden a un punto central. El tratamiento con menor grosor contenía 6.92% de proteína de soya y 50% de glicerol (Cuadro 8).

Cuadro 8. Espesor en milímetros de los recubrimientos con variables de porcentaje de sustitución de almidón de yuca por proteína de soya (AY-PS) y relación de plastificantes.

Tratamiento	% Sustitución AY-PS	% Relación de plastificantes <sup>€</sup>	Espesor ± DE <sup>¥</sup>
T1	8.830	14.640	0.154 ± 0.018
T2	8.830	85.360	0.178 ± 0.016
T3	21.570	14.640	0.177 ± 0.015
T4	21.570	85.360	0.175 ± 0.017
T5	6.192	50.000	0.148 ± 0.033
T6	24.207	50.000	0.174 ± 0.018
T7	15.200	0.000	0.196 ± 0.043
T8	15.200	100.000	0.167 ± 0.027
T9	15.200	50.000	0.185 ± 0.029
T10	15.200	50.000	0.194 ± 0.037
T11	15.200	50.000	0.164 ± 0.018
T12	15.200	50.000	0.200 ± 0.012
<b>% Coeficiente de Variación</b>			<b>14.50</b>

<sup>€</sup>Hace referencia a la proporción de glicerol como plastificante, el restante es sorbitol.

<sup>¥</sup>Media ± desviación estándar

No se encontraron variables significativas para este atributo, por lo tanto no se pudo construir un modelo matemático para la variable dependiente espesor (Cuadro 9). El espesor se atribuye a la cantidad de solución filmogénica que se utilizó para el vaciado en placa.

Cuadro 9. Coeficientes de regresión y sus probabilidades (P) para espesor en revestimientos comestibles.

Variable	Coefficiente	P
Intercepto	1.82E-01	7.60E-05
X <sub>1</sub>	1.18E-02	6.71E-02ns
X <sub>1</sub> <sup>2</sup>	-5.88E-03	2.99E-01ns
X <sub>2</sub>	-3.25E-03	4.95E-01ns
X <sub>2</sub> <sup>2</sup>	-4.13E-03	4.44E-01ns
X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	7.25E-03	3.09E-01ns
Falta de ajuste		0.310ns
R <sup>2</sup>		0.58

X<sub>1</sub>: % Proteína de soya

X<sub>2</sub>: % Relación de plastificantes

\*Significativo a P<0.05

<sup>ns</sup>No significativo

**Fuerza de perforación.** Se encontró en un rango entre 4.18 y 9.04 N. El valor máximo se encontró en el tratamiento con 8.83% de proteína de soya y 14.64% de glicerol como plastificante, este corresponde a un tratamiento factorial del diseño. El tratamiento con menor fuerza de perforación fue el tratamiento 8, que contiene 15.2% de proteína de soya y el 100% de glicerol como plastificante (Cuadro 10).

Cuadro 10. Fuerza de perforación en Newtons de bioplásticos con variables de porcentaje de sustitución de almidón de yuca por proteína de soya (AY-PS) y relación de plastificantes.

Tratamiento	% Sustitución AY-PS	% Relación de plastificantes <sup>€</sup>	Fuerza de perforación ± DE <sup>¥</sup>
T1	8.830	14.640	9.04 ± 1.52
T2	8.830	85.360	6.27 ± 1.22
T3	21.570	14.640	8.54 ± 1.22
T4	21.570	85.360	5.52 ± 2.65
T5	6.192	50.000	6.06 ± 0.51
T6	24.207	50.000	6.28 ± 1.41
T7	15.200	0.000	6.78 ± 1.38
T8	15.200	100.000	4.18 ± 0.43
T9	15.200	50.000	8.74 ± 1.08
T10	15.200	50.000	7.74 ± 1.25
T11	15.200	50.000	8.01 ± 1.19
T12	15.200	50.000	8.38 ± 0.70
<b>% Coeficiente de variación</b>			<b>18.69</b>

<sup>€</sup>Hace referencia a la proporción de glicerol como plastificante, el restante es sorbitol.

<sup>¥</sup>Media ± desviación estándar

Con los coeficientes de regresión (Cuadro 11) que fueron significativos se construyó la ecuación 9 y a partir de esta se generó la figura 6 que muestra el comportamiento de las variables. Los resultados coinciden con Ruano (2009) en el cual los bioplásticos fueron elaborados por extrusión. Rocha (2009) y Merino (2015) encontraron, que el glicerol le ofrece flexibilidad al bioplástico reduciendo la fuerza necesaria para perforarlo. Este efecto es causado por la disminución en la densidad de las proteínas, los polipéptidos quedan libres resultando en películas más resistentes (Monterrey y Sobral 2000).

Cuadro 11. Coeficientes de regresión y sus probabilidades (P) para Fuerza de perforación en bioplásticos comestibles.

Variable	Coefficiente	P
Intercepto	8.22E+00	4.00E-05
X <sub>1</sub>	-1.19E-01	4.95E-01 <sup>ns</sup>
X <sub>1</sub> <sup>2</sup>	-6.43E-01	3.29E-02*
X <sub>2</sub>	-1.18E+00	4.50E-03*
X <sub>2</sub> <sup>2</sup>	-9.90E-01	1.03E-02*
X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	-6.13E-02	7.95E-01 <sup>ns</sup>
Falta de ajuste		4.67E-02*
R <sup>2</sup>		0.76
F. Calculado		77.83
F. Tabular		4.07

X<sub>1</sub>: % Proteína de soya

X<sub>2</sub>: % Relación de plastificantes

\*Significativo a P<0.05

<sup>ns</sup>No significativo

$$\text{Fuerza de perforación} = 8.22E - 0.6432X_1^2 - 1.18272X_2 - 0.98982X_2^2 \quad [9]$$

**Deformación por perforación.** El análisis mostró valores entre 19.1 y 19.63%. El tratamiento que menor deformación tuvo fue el que tenía el 100% de glicerol como plastificante y un 15.2% de proteína de soya, este era un tratamiento axial con el valor máximo de glicerol como plastificante. El tratamiento con mayor deformación fue el tratamiento con 14.64% de plastificante y 21.64% de proteína de soya, este fue un tratamiento factorial (Cuadro 12).

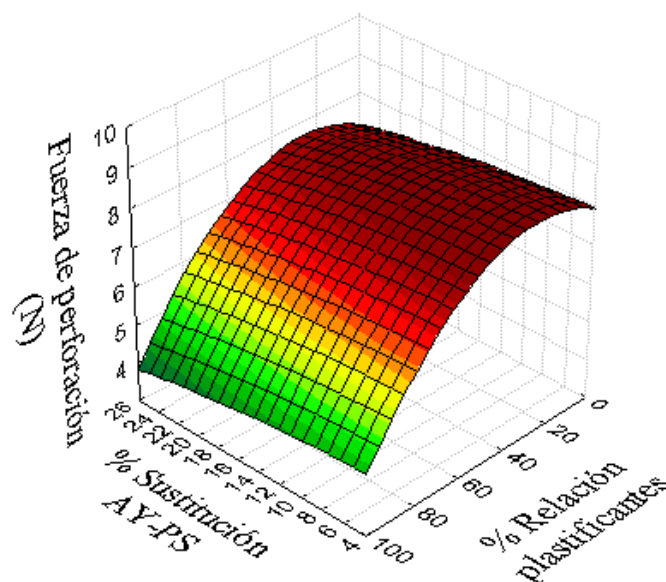


Figura 6. Efecto de sustitución (%) de almidón de yuca por proteína de soya (AY-PS) y relación de plastificantes (% hace referencia al glicerol, el resto corresponde a sorbitol) en fuerza de perforación en Newton de bioplásticos comestibles..

Cuadro 12. Deformación por perforación (%) de bioplásticos con variables de porcentaje de sustitución de almidón de yuca por proteína de soya (AY-PS) y relación de plastificantes.

Tratamiento	% Sustitución AY-PS	% Relación de plastificantes <sup>€</sup>	Deformación por perforación $\pm$ DE <sup>¥</sup>
T1	8.830	14.640	19.53 $\pm$ 0.13
T2	8.830	85.360	19.40 $\pm$ 0.06
T3	21.570	14.640	19.63 $\pm$ 0.28
T4	21.570	85.360	19.39 $\pm$ 0.15
T5	6.192	50.000	19.17 $\pm$ 0.05
T6	24.207	50.000	19.31 $\pm$ 0.09
T7	15.200	0.000	19.60 $\pm$ 0.23
T8	15.200	100.000	19.10 $\pm$ 0.04
T9	15.200	50.000	19.12 $\pm$ 0.06
T10	15.200	50.000	19.21 $\pm$ 0.17
T11	15.200	50.000	19.14 $\pm$ 0.05
T12	15.200	50.000	19.26 $\pm$ 0.15
<b>%CV</b>			<b>0.74</b>

<sup>€</sup>Hace referencia a la proporción de glicerol como plastificante, el restante es sorbitol.

<sup>¥</sup>Media  $\pm$  desviación estándar

La ecuación 10 fue definida a partir de los coeficientes de regresión y probabilidad de esta variable dependiente en los cuales se observó que el efecto de la proteína de soya no fue significativo, solamente se consideró la variable de porcentaje de relación de plastificantes para la ecuación que fue de carácter predictivo por su ajuste de modelo de 74% (Cuadro

13). El comportamiento de la ecuación puede observarse en la figura 7 en la cual se aprecia que al reducir la proporción de glicerol como plastificante el porcentaje de deformación por perforación disminuyó, lo que significa que el sorbitol tuvo mejor desempeño para obtener mejor deformación por perforación. Este resultado difiere de un estudio con suero ácido donde se compararon sorbitol y glicerol como plastificantes; se obtuvo que el glicerol tuvo mayor porcentaje de deformación (Brandao y Peña 2012).

Cuadro 13. Coeficientes de regresión y sus probabilidades (P) para porcentaje de deformación por perforación en bioplásticos comestibles.

<b>Variab</b> les	<b>Coeficientes</b>	<b>P</b>
Intercepto	1.92E+01	0.00E+00
X <sub>1</sub>	3.62E-02	2.02E-01 <sup>ns</sup>
X <sub>1</sub> <sup>2</sup>	7.63E-02	5.45E-02 <sup>ns</sup>
X <sub>2</sub>	-1.34E-01	9.20E-03*
X <sub>2</sub> <sup>2</sup>	1.32E-01	1.31E-02*
X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	-2.58E-02	4.72E-01 <sup>ns</sup>
Falta de ajuste		0.066 <sup>ns</sup>
R <sup>2</sup>		0.74
F. Calculado		7.55
F. Tabular		4.26

X<sub>1</sub>: % Proteína de soya

X<sub>2</sub>: % Relación de plastificantes

\*Significativo a P<0.05

<sup>ns</sup>No significativo

Shimazu y colaboradores (2007) encontraron que en bioplásticos elaborados con almidón de yuca, el glicerol tuvo mayor deformación a mayor actividad de agua. Altas concentraciones de plastificantes pueden causar un efecto denominado antiplastificante, en el cual la concentración de plastificante reduce la cohesión de las moléculas, reduciendo la flexibilidad del mismo (Mali *et al.* 2008).

$$\text{Deformación por perforación} = 19.18372 - 0.13364X_2 + 0.13155X_2^2 \quad [10]$$

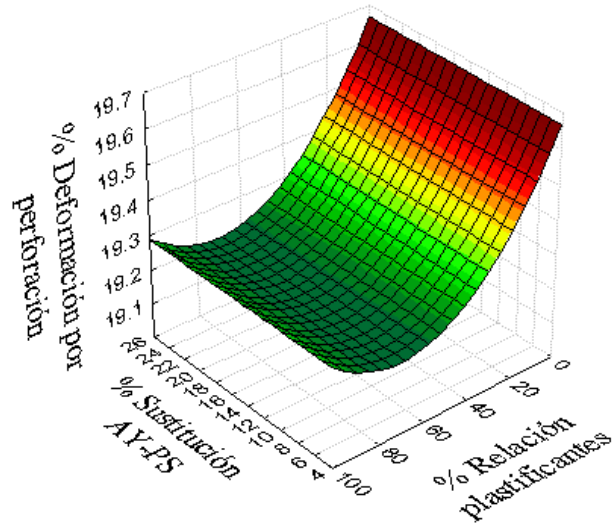


Figura 7. Efecto de sustitución (%) de almidón de yuca por proteína de soya (AY-PS) y relación de plastificantes (% hace referencia al glicerol, el resto corresponde a sorbitol) en deformación por perforación (%) de bioplásticos comestibles.

**Fuerza de tensión.** Se encontraron valores entre 4.12 y 10.45 Newtons. La mayor tensión corresponde al tratamiento con 15.20% de proteína de soya y el 100% de sorbitol como plastificante. El tratamiento con menor tensión correspondió a un 15.20% de proteína de soya y 100% de glicerol como pastificante (Cuadro 15). Los coeficientes de regresión no fueron significativos según sus probabilidades, por lo tanto no fue posible contruir un modelo matemático para la variable dependiente de fuerza de tensión (Cuadro 14).

Cuadro 14. Coeficientes de regresión y sus probabilidades (P) de fuerza de tensión en bioplásticos comestibles.

Variable	Coficiente	P
Intercepto	1.05E+01	3.68E-02
X <sub>1</sub>	-7.38E-01	7.45E-01ns
X <sub>1</sub> <sup>2</sup>	-2.38E+00	3.79E-01ns
X <sub>2</sub>	-1.55E+00	5.08E-01ns
X <sub>2</sub> <sup>2</sup>	-2.03E+00	4.44E-01ns
X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	-2.23E-01	9.44E-01ns
Falta de ajuste		0.942ns
R <sup>2</sup>		0.40

X<sub>1</sub>: % Proteína de soya

X<sub>2</sub>: % Relación de plastificantes

\*Significativo a P<0.05

<sup>ns</sup>No significativo

Cuadro 15. Tensión en Newton de bioplásticos con variables de porcentaje de sustitución de almidón de yuca por proteína de soya (AY-PS) y relación de plastificantes.

Tratamiento	% Sustitución AY-PS	% Relación de plastificantes <sup>€</sup>	Tensión ± DE <sup>¥</sup>
T1	8.830	14.640	6.04 ± 0.82
T2	8.830	85.360	4.60 ± 0.97
T3	21.570	14.640	6.65 ± 1.60
T4	21.570	85.360	4.32 ± 0.80
T5	6.192	50.000	8.68 ± 1.47
T6	24.207	50.000	4.26 ± 0.68
T7	15.200	0.000	10.45 ± 2.84
T8	15.200	100.000	4.12 ± 0.51
T9	15.200	50.000	7.81 ± 1.77
T10	15.200	50.000	8.11 ± 1.80
T11	15.200	50.000	6.90 ± 1.12
T12	15.200	50.000	7.04 ± 1.20
<b>% Coeficiente de Variación</b>			<b>21.86</b>

<sup>€</sup>Hace referencia a la proporción de glicerol como plastificante, el restante es sorbitol.

<sup>¥</sup>Media ± desviación estándar

**Deformación por tensión.** El rango fue entre 47.51 y 110.56%. El tratamiento con 15.20% de proteína de soya y 100% de glicerol como plastificante demostró un menor porcentaje de deformación. El tratamiento con mayor porcentaje de deformación fue el tratamiento con 8.83% de proteína de soya y 14.64% de glicerol como plastificante (Cuadro 16).

Cuadro 16. Deformación por tensión (%) de bioplásticos con variables de porcentaje de sustitución de almidón de yuca por proteína de soya (AY-PS) y relación de plastificantes.

Tratamiento	% Sustitución AY-PS	% Relación de plastificantes <sup>€</sup>	Deformación por tensión ± DE <sup>¥</sup>
T1	8.830	14.640	110.56 ± 8.95
T2	8.830	85.360	71.16 ± 13.31
T3	21.570	14.640	86.03 ± 7.82
T4	21.570	85.360	81.38 ± 10.28
T5	6.192	50.000	52.15 ± 7.36
T6	24.207	50.000	49.66 ± 4.48
T7	15.200	0.000	85.80 ± 0.75
T8	15.200	100.000	47.51 ± 3.70
T9	15.200	50.000	66.08 ± 9.77
T10	15.200	50.000	74.95 ± 15.78
T11	15.200	50.000	63.48 ± 11.30
T12	15.200	50.000	85.34 ± 8.03
<b>% Coeficiente de Variación</b>			<b>13.14</b>

<sup>€</sup>Hace referencia a la proporción de glicerol como plastificante, el restante es sorbitol.

<sup>¥</sup>Media ± desviación estándar

Con los coeficientes de regresión (Cuadro 17) se construyó la ecuación 11, para ello solo se consideraron las variables significativas ( $P < 0.05$ ) que en este caso solo es el efecto cuadrático del plastificante, el cual muestra un efecto decreciente. El modelo se considera de carácter tendencioso ya que su ajuste es menor a 60%. El comportamiento se puede observar en la figura 8, este es inverso al observado por Brandao y Peña (2012) que encontraron que el sorbitol tenía un menor efecto plastificante que el glicerol pero su efecto contrario en este experimento se atribuye a las diferentes temperaturas a las que fueron sometidos, ellos sometieron el glicerol a temperaturas de 90 °C. Ozdemir y Floros (2008) encontraron que el sorbitol como plastificante brinda mayor porcentaje de elongación comparado al glicerol.

Cuadro 17. Coeficientes de regresión y sus probabilidades (P) para deformación por tensión bioplásticos.

Variable	Coefficiente	P
Intercepto	7.25E+01	6.90E-04
X <sub>1</sub>	-2.23E+00	5.69E-01 <sup>ns</sup>
X <sub>1</sub> <sup>2</sup>	-3.65E+00	4.19E-01 <sup>ns</sup>
X <sub>2</sub>	-1.23E+01	3.92E-02*
X <sub>2</sub> <sup>2</sup>	4.23E+00	3.59E-01 <sup>ns</sup>
X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	8.69E+00	1.77E-01 <sup>ns</sup>
Falta de ajuste		0.095 <sup>ns</sup>
R <sup>2</sup>		0.48
F. Calculado		4.84
F. Tabular		4.96

X<sub>1</sub>: % Proteína de soya

X<sub>2</sub>: % Relación de plastificantes

\*Significativo a  $P < 0.05$

<sup>ns</sup>No significativo

$$\text{Deformación por tensión} = 72.4572 - 12.2745X_2 \quad [11]$$

**Módulo de elasticidad.** Fue determinado a partir de las 10 repeticiones del análisis realizadas por cada tratamiento y no se le realizaron análisis estadísticos individuales porque se obtuvo un promedio con una macro para el software EXCEL 2013. El tratamiento que mostró mayor módulo de elasticidad fue el tratamiento con 15.20% de proteína de soya y 100% de sorbitol como plastificante y el menor módulo de elasticidad se observó en el tratamiento con 21.57% de proteína y 85.36% de glicerol como plastificante (Cuadro 18).

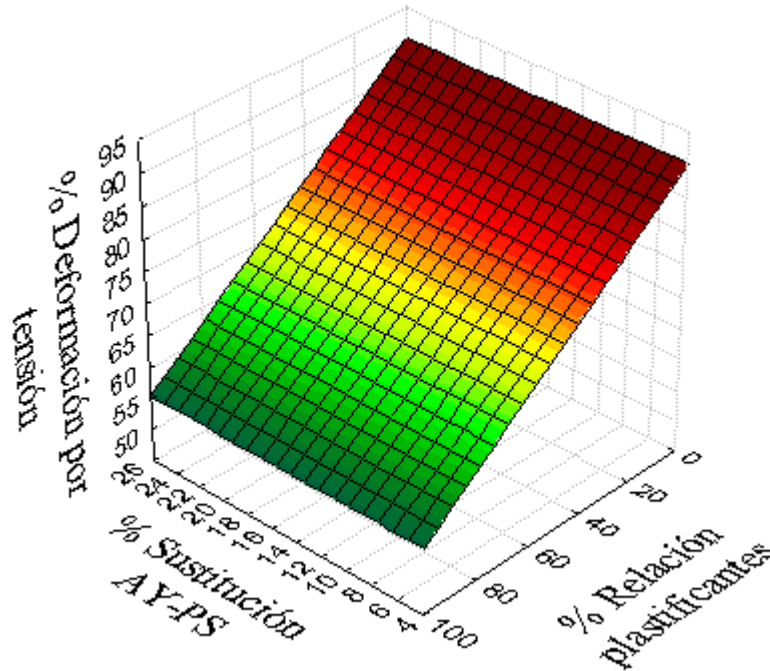


Figura 8. Efecto de sustitución (%) de almidón de yuca por proteína de soya (AY-PS) y relación de plastificantes (% hace referencia al glicerol, el resto corresponde a sorbitol) en deformación por tensión de bioplásticos comestibles.

Cuadro 18. Módulo de elasticidad (MPa) de bioplásticos con variables de porcentaje de sustitución de almidón de yuca por proteína de soya (AY-PS) y relación de plastificantes.

Tratamiento	% Sustitución AY-PS	% Relación de plastificantes	Módulo de elasticidad
T1	8.830	14.640	4.176
T2	8.830	85.360	1.897
T3	21.570	14.640	5.227
T4	21.570	85.360	1.099
T5	6.192	50.000	7.135
T6	24.207	50.000	1.946
T7	15.200	0.000	9.265
T8	15.200	100.000	1.739
T9	15.200	50.000	6.445
T10	15.200	50.000	6.485
T11	15.200	50.000	5.260
T12	15.200	50.000	4.297

Los coeficientes de regresión que se muestran en el cuadro 19 se usaron para construir la ecuación 12. Solo se consideraron los coeficientes que fueron significativos ( $P < 0.05$ ), y se generó la Figura 9 en la cual se observa el comportamiento de la variable dependiente. Estos

resultados coincidieron con los obtenidos por Rocha (2009) donde a menor contenido de glicerol, el módulo de elasticidad fue mayor, esto hace sentido a la flexibilidad que le otorgó el glicerol a los biopolímeros volviéndolos menos resistentes a deformación. Cao y colaboradores (2007) evaluaron proteína de soya y gelatina, encontraron que la gelatina tuvo mayor módulo de elasticidad que la proteína de soya. Lima y colaboradores (2010) encontraron que el aumento de colágeno y de glicerol incrementa la elasticidad.

Cuadro 19. Coeficientes de regresión y sus probabilidades (P) para módulo de elasticidad en bioplástico comestible

<b>Variables</b>	<b>Coefficiente</b>	<b>P</b>
Intercepto	5.62E+00	1.74E-03
X <sub>1</sub>	-8.86E-01	9.72E-02ns
X <sub>1</sub> <sup>2</sup>	-1.02E+00	9.09E-02ns
X <sub>2</sub>	-2.13E+00	1.05E-02*
X <sub>2</sub> <sup>2</sup>	-5.41E-01	2.84E-01ns
X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	-4.62E-01	4.44E-01ns
Falta de ajuste		0.107ns
R <sup>2</sup>		0.72
F. Calculado		10.15
F. Tabular		4.96

X<sub>1</sub>: % Proteína de soya

X<sub>2</sub>: % Relación de plastificantes

\*Significativo a P<0.05

<sup>ns</sup>No significativo

$$\text{Módulo de elasticidad} = 5.62204 - 2.13142X_2 \quad [12]$$

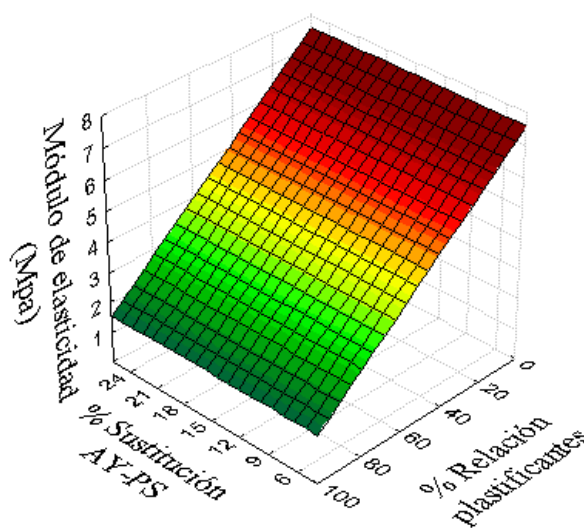


Figura 9. Efecto de sustitución (%) de almidón de yuca por proteína de soya (AY-PS) y relación de plastificantes (% hace referencia al glicerol, el resto corresponde a sorbitol) en módulo de elasticidad (MPa) de bioplásticos comestibles.

**Permeabilidad a vapor de agua (PVA).** Se obtuvieron valores entre 0.0022 y 0.0057 g.mm/h.m<sup>2</sup>.kPa. El menor valor fue para el tratamiento que contiene 15.2% de proteína de soya y 100% de sorbitol como plastificante, este fue un tratamiento axial. El valor con mayor permeabilidad fue el tratamiento con 21.57% de proteína de soya y 85.36% de glicerol como plastificante (Cuadro 20).

Los coeficientes de regresión obtenidos presentaron un 32% de ajuste de modelo (Cuadro 21). Se construyó la ecuación 13 de tipo tendencioso. La ecuación fue elaborada únicamente con los coeficientes que tuvieron significancia (P<0.05). El comportamiento de la figura 10 demostró que al disminuir el porcentaje de almidón en la formulación, se aumentó la permeabilidad al vapor de agua (Villada *et al.* 2007) ya que la amilosa ofrece mejor barrera al vapor de agua (Tapia-Blácido *et al.* 2010). Los resultados también fueron comparables con los resultados obtenidos en otros estudios con proteína de gluten (Gontard *et al.* 1993). Rocha y colaboradores (2014) obtuvieron que a mayor cantidad de glicerol, más PVA porque los bioplásticos son menos densos. Estudios en gelatina encontraron que el uso de sorbitol como plastificante ofreció valores más bajos de PVA que el glicerol (Fakhouri y Queiroz 2009).

Cuadro 20. Permeabilidad a vapor de agua (PVA) en g.mm/h.m<sup>2</sup>.kPa de los bioplásticos con variables de porcentaje de sustitución de almidón de yuca por proteína de soya (A-PS) y relación de plastificantes.

Tratamiento	% Sustitución AY-PS	% Relación de plastificantes <sup>€</sup>	PVA ± DE <sup>¥</sup>
T1	8.830	14.640	0.0037 ± 0.0003
T2	8.830	85.360	0.0042 ± 0.0003
T3	21.570	14.640	0.0041 ± 0.0005
T4	21.570	85.360	0.0057 ± 0.0005
T5	6.192	50.000	0.0034 ± 0.0003
T6	24.207	50.000	0.0028 ± 0.0005
T7	15.200	0.000	0.0024 ± 0.0002
T8	15.200	100.000	0.0022 ± 0.0001
T9	15.200	50.000	0.0031 ± 0.0004
T10	15.200	50.000	0.0023 ± 0.0001
T11	15.200	50.000	0.0024 ± 0.0001
T12	15.200	50.000	0.0025 ± 0.0002
<b>% Coeficiente de Variación</b>			<b>10.30</b>

<sup>€</sup>Hace referencia a la proporción de glicerol como plastificante, el restante es sorbitol.

<sup>¥</sup>Media ± desviación estándar

Cuadro 21. Coeficientes de regresión y sus probabilidades (P) para permeabilidad a vapor de agua (PVA = g.mm/h.m<sup>2</sup>.kPa) en bioplásticos comestibles.

Variables	Coeficientes	P
Intercepto	2.58E-03	7.37E-04
X <sub>1</sub>	1.49E-04	3.25E-01 <sup>ns</sup>
X <sub>1</sub> <sup>2</sup>	6.82E-04	1.72E-02*
X <sub>2</sub>	2.10E-04	1.98E-01 <sup>ns</sup>
X <sub>2</sub> <sup>2</sup>	2.81E-04	1.42E-01 <sup>ns</sup>
X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	2.75E-04	2.23E-01 <sup>ns</sup>
Falta de ajuste		0.017*
R <sup>2</sup>		0.32
F. Calculado		30.00
F. Tabular		4.96

X<sub>1</sub>: % Proteína de soya

X<sub>2</sub>: % Relación de plastificantes

\*Significativo a P<0.05

<sup>ns</sup>No significativo

$$PVA = 0.00258 + 0.00068X_1^2 \quad [13]$$

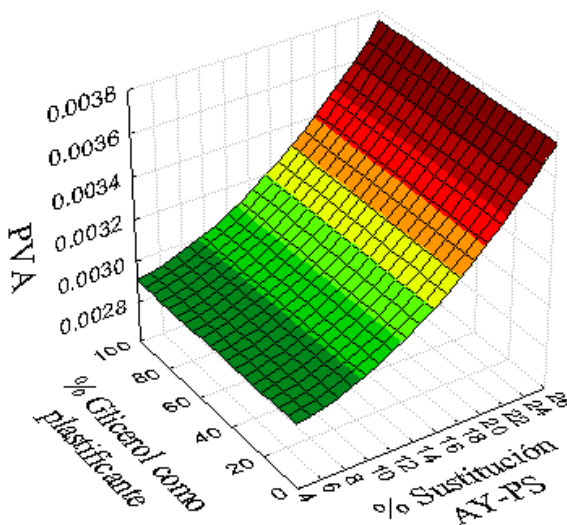


Figura 10. Efecto de sustitución (%) de almidón de yuca por proteína de soya (AY-PS) y relación de plastificantes (% hace referencia al glicerol, el resto corresponde a sorbitol) en permeabilidad a vapor de agua (PVA) de bioplásticos comestibles.

**Optimización del bioplástico.** Se consideraron las variables dependientes  $\Delta E$ , porcentaje de deformación por perforación, modulo de young y permeabilidad a vapor de agua. La optimización se observa en la figura 11, se determinó que los niveles óptimos para obtener las características deseadas (variables dependientes) en el biopolímero para revestir manzanas correspondía a 9.795% de proteína de soya y un 100% de sorbitol como plastificante. Esta formulación se utilizó en la segunda etapa del estudio.

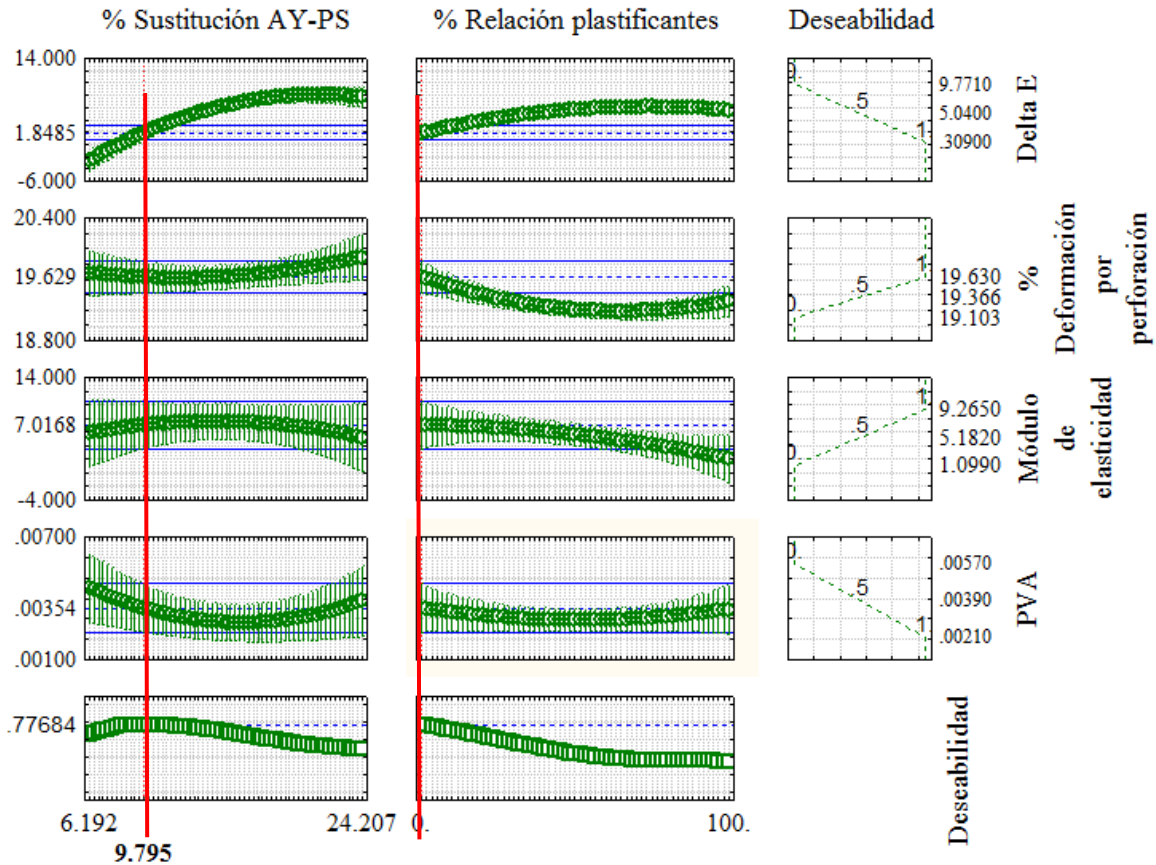


Figura 11. Valores óptimos de las variables independientes sobre las propiedades ópticas, físicas y de barrera de un biopolímero con sustitución de almidón de yuca por proteína de soya y relación de plastificantes glicerol y sorbitol, mostrando la proporción de glicerol.

**Superficie de degradación de manzanas.** Las manzanas mostraron un lento descenso en el porcentaje del área superficial sin degradación en condiciones aceleradas (50 °C y 60% HR). Al compararlas con las manzanas sin revestimiento, se observó que las manzanas revestidas mantuvieron superficie sin degradarse hasta casi cuatro veces más tiempo que las manzanas no revestidas. En las figuras 12 y 13 se observó el comportamiento de las superficies de la manzana. Según la figura 12 la tasa de empardeamiento que sufrieron las manzanas en las primeras 23 horas fue mayor que en el resto del tiempo. Lee y colaboradores (2003) utilizaron un revestimiento con ácido gálico en manzanas cortadas que permitió evitar la oxidación de la manzana por más tiempo. Además las manzanas revestidas conservaron mayor porcentaje de superficie en buen estado durante más tiempo al igual que los resultados obtenidos por Pizato y colaboradores (2013) quienes utilizaron gomas para la elaboración de los bioplásticos en manzanas cortadas.

Según el CODEX STAN 245 (2005) las manzanas que se obtuvieron luego de las 20 horas ya no entraban en ninguna de las categorías para ser comercializables, el tiempo al que se realizaron los primeros análisis no permitió identificar en que tiempo aún eran comercializables.

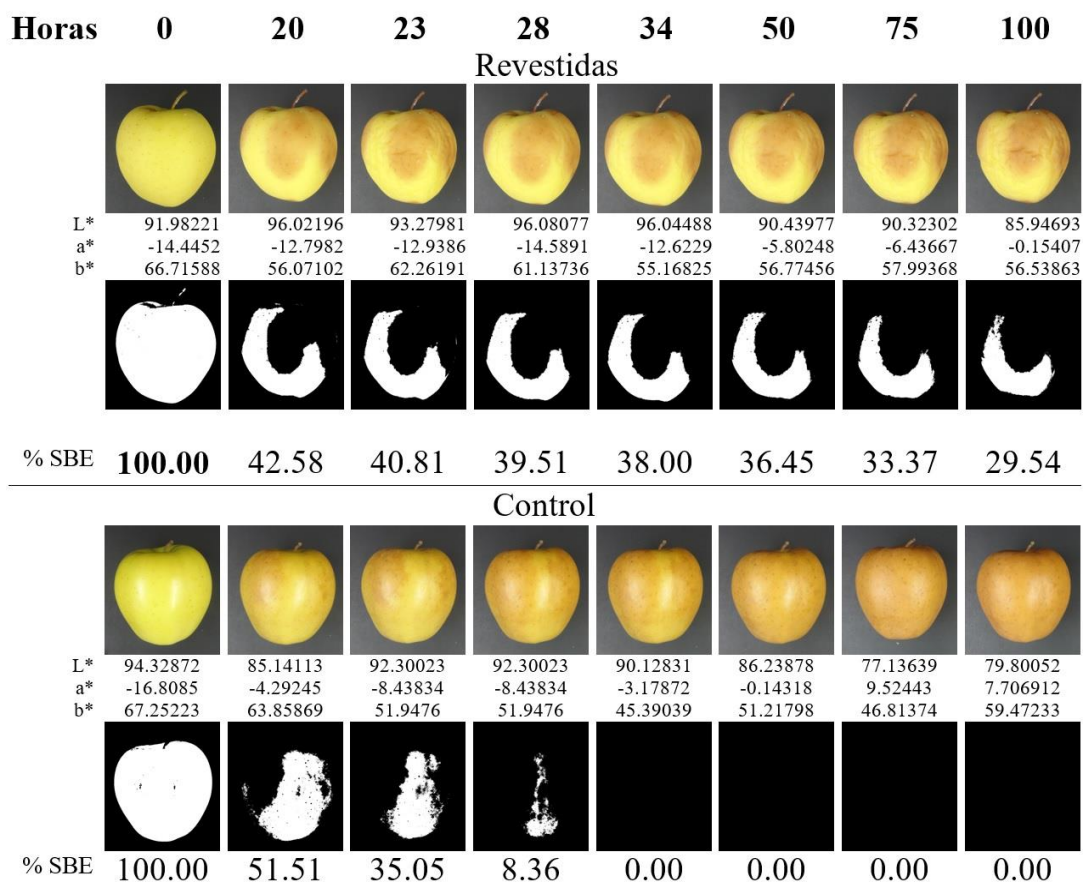


Figura 12. Degradación en el tiempo de la superficie en buen estado (% SBE) de manzanas revestidas con biopolímero de proteína de soja, almidón de yuca y sorbitol comparado con manzanas sin revestimiento en vida anaquel acelerada.

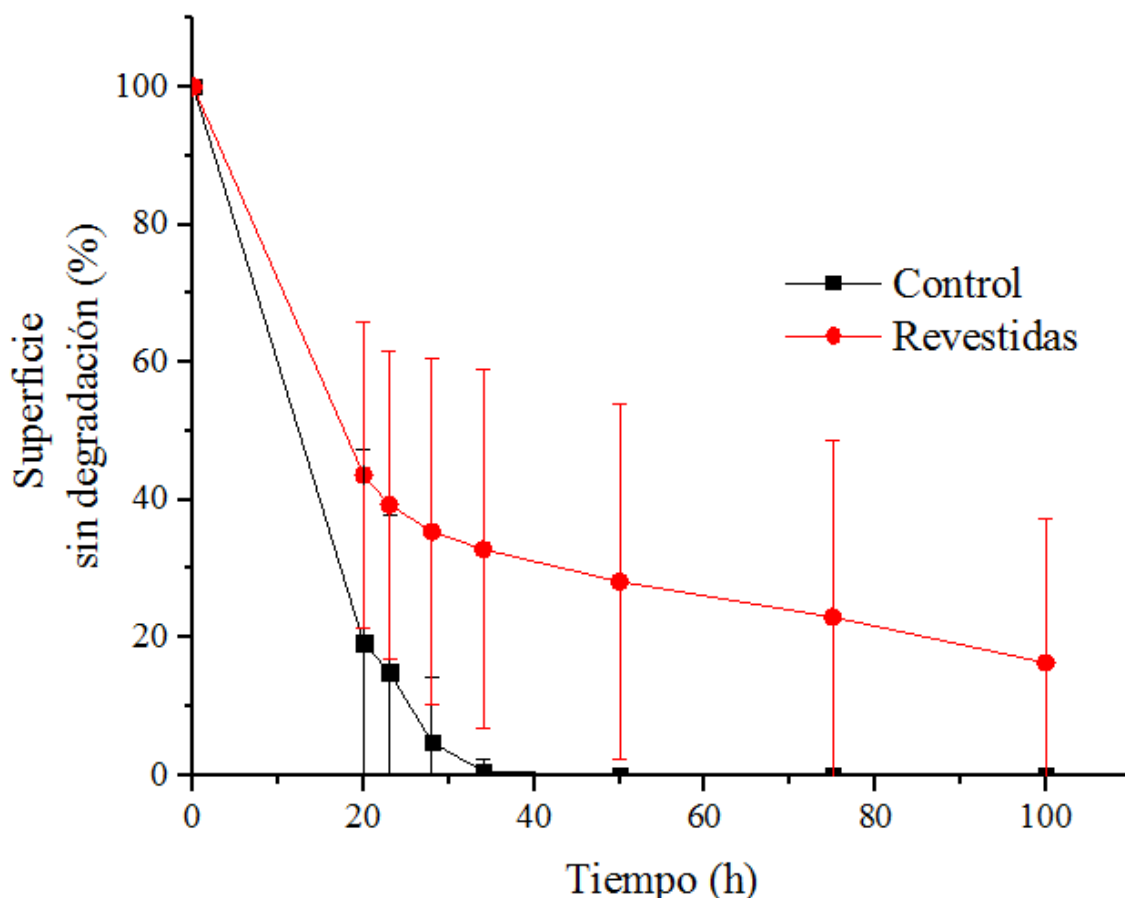


Figura 13. Comportamiento en el tiempo de la degradación de la superficie de manzanas revestidas con biopolímero de proteína de soya, almidón de yuca y sorbitol como plastificante en vida anaquel acelerada.

**Pérdida de peso.** No se observaron diferencias estadísticas entre las manzanas revestidas y las no revestidas a lo largo del tiempo, si se observó la tendencia normal de pérdida de peso de las manzanas (Figura 14); esto se debe a la respiración por transpiración y es considerada como uno de los principales efectos de deterioro (Lu 2004; Moggia y Pereira 2007).

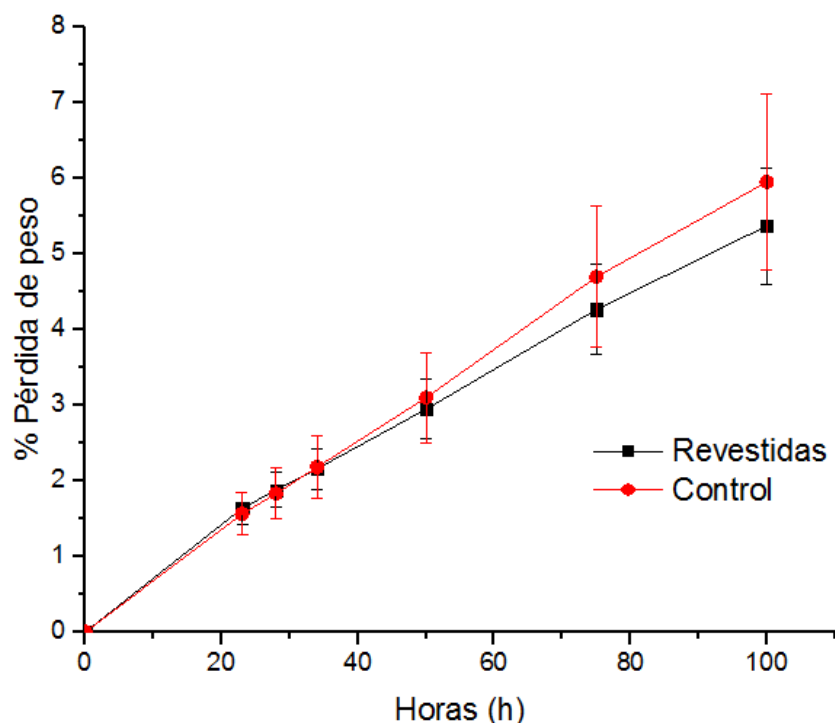


Figura 14. Efecto en la pérdida de peso de manzanas Golden delicious revestidas con biopolímero de proteína de soya, almidón de yuca y sorbitol como plastificante en condiciones aceleradas.

**Firmeza.** No se encontraron diferencias a lo largo del tiempo, excepto al inicio del experimento (Cuadro 22). Entre las horas 0 y 23 la firmeza aumentó, esto se atribuye a la variabilidad por la fuente de las manzanas ya que fueron compradas en un supermercado y se desconoce exactamente cuales fueron las condiciones a las que fueron expuestas las manzanas y el tiempo que estas tenían de haber sido cosechadas.

Cuadro 22. Firmeza de manzanas Golden delicious revestidas con biopolímero de proteína de soya, almidón de yuca y sorbitol expresada en N

Horas	Tratamiento <sup>¥</sup>	
	Revestidas	Control
0	11.423 ± 1.951 <sup>B</sup>	15.278 ± 0.581 <sup>A</sup>
23	5.711 ± 3.807 <sup>A</sup>	12.632 ± 4.008 <sup>A</sup>
28	6.013 ± 0.596 <sup>A</sup>	5.828 ± 4.149 <sup>A</sup>
34	7.239 ± 0.637 <sup>A</sup>	5.671 ± 1.021 <sup>A</sup>
75	5.794 ± 1.704 <sup>A</sup>	6.261 ± 2.120 <sup>A</sup>
<b>% Coeficiente de Variación</b>		<b>24.57</b>
<b>R<sup>2</sup></b>		<b>0.93</b>

<sup>¥</sup>Medias con distinta letra en la misma fila son estadísticamente diferentes (P<0.05)

Los grados Brix se mantuvieron estadísticamente iguales entre los tratamientos durante las primeras 28 horas del estudio. A las 34 horas se observó diferencia entre los dos tratamientos, se atribuye a la variabilidad de las manzanas (Cuadro 23). No se observaron cambios en el pH de las manzanas durante el estudio (Cuadro 24), a las 34 horas se observó diferencia estadística entre los tratamientos pero al igual que la variación de los grados brix, se atribuye a la falta de homogeneidad del lote estudiado.

Cuadro 23. Comparativo de los grados brix de manzanas Golden Delicious recubiertas con biopolímero y sin revestimiento.

Horas	Tratamiento <sup>¥</sup>	
	Revestida ± D.E.	Control ± D.E.
0	11.53 ± 0.45 <sup>A</sup>	13.06 ± 1.00 <sup>A</sup>
23	8.83 ± 1.26 <sup>A</sup>	10.30 ± 1.66 <sup>A</sup>
28	9.80 ± 1.35 <sup>A</sup>	8.06 ± 0.58 <sup>A</sup>
34	10.90 ± 0.3 <sup>A</sup>	10.03 ± 0.37 <sup>B</sup>
75	10.83 ± 0.64 <sup>B</sup>	13.26 ± 0.2 <sup>A</sup>
100	12.80 ± 0.52 <sup>A</sup>	12.26 ± 0.63 <sup>A</sup>

<sup>¥</sup>Medias con letra distinta en la misma fila son estadísticamente diferentes (P<0.05)

Cuadro 24. Comparativo de pH de manzanas recubiertas con biopolímero y controles.

Horas	Tratamiento ± D.E. <sup>¥</sup>	
	Revestida	Control
0	3.88 ± 0.02 <sup>A</sup>	3.86 ± 0.02 <sup>A</sup>
23	4.09 ± 0.03 <sup>A</sup>	4.33 ± 0.22 <sup>A</sup>
28	3.84 ± 0.09 <sup>A</sup>	3.90 ± 0.18 <sup>A</sup>
34	3.81 ± 0.04 <sup>B</sup>	4.22 ± 0.02 <sup>A</sup>
75	4.00 ± 0.16 <sup>A</sup>	4.11 ± 0.06 <sup>A</sup>
100	4.09 ± 0.02 <sup>B</sup>	4.23 ± 0.03 <sup>A</sup>

<sup>¥</sup>Medias con letra distinta en la misma fila son estadísticamente diferentes (P<0.05)

#### **4. CONCLUSIONES**

- La combinación de un 9.795% de proteína de soya, 90.205% de almidón de yuca y un 100% de sorbitol como plastificante en un recubrimiento ofrece las mejores propiedades ópticas, mecánicas y de barrera para extender la vida anaquel de manzanas.
- Se generaron 5 modelos matemáticos de carácter predictivo y 2 tendenciosos para estimar el comportamiento de las propiedades ópticas, mecánicas y de barrera de revestimientos elaborados con proteína de soya, almidón de yuca, glicerol y sorbitol.
- No se logró determinar el efecto en la vida anaquel del revestimiento ya que a las 23 horas ambos tratamientos habían perdido la calidad mínima necesaria para poder comercializarlas, sin embargo, el revestimiento mantuvo más superficie sin degradación por mayor tiempo.

## **5. RECOMENDACIONES**

- Reformular los puntos centrales para evaluar cambios en las propiedades de los bioplásticos en otros rangos de las variables independientes.
- Utilizar proteína aislada de soya en lugar de proteína concentrada ya que el resto de componentes pueden alterar el comportamiento del biopolímero.
- Evaluar producción de etileno, CO<sub>2</sub> y contenido de almidón, que son indicadoras de madurez y vida anaquel de la manzana, incrementando el número de manzanas utilizadas en el estudio buscando la forma de que estas sean lo mas homogéneas posible.
- Evaluar la degradación de las manzanas con menor aceleración de la respiración para de esta forma poder hacer mediciones con mayor frecuencia y crear regresiones que permitan predecir el comportamiento.
- Realizar estudios sensoriales para determinar aceptabilidad del revestimiento por los consumidores.
- Investigar factibilidad económica de la elaboración de los revestimientos estudiados.
- Investigar el uso del revestimiento optimizado en este estudio en otros productos hortofrutícolas.

## 6. LITERATURA CITADA

Anker M, Stading M, Hermansson A-M. 1999. Effects of pH and the Gel State on the Mechanical Properties, Moisture Contents, and Glass Transition Temperatures of Whey Protein Films. *J. Agric. Food Chem.* 47:1878–1886.

ASTM. 1995. Annual Book of ASTM Standards. D828–95a ed. Philadelphia.

Bourles E, Mehinagic E, Courthaudon JL, Jourjon F. 2009. Impact of vacuum cooking process on the texture degradation of selected apple cultivars. *J. Food Sci.* 74:512–518.

Brandao J, Peña Á. 2012. Efecto de dos temperaturas y tres combinaciones de plastificante en las propiedades físicas de una película comestible a base de proteína de suero ácido.

Cao N, Fu Y, He J. 2007. Preparation and physical properties of soy protein isolate and gelatin composite films. *Food Hydrocoll.* 21:1153–1162.

Chariguaman JA. 2015. Caracterización de bioplástico de almidón elaborado por el método de casting reforzado con albedo de maracuyá (*Passiflora edulis* s pp.). :68.

Codex Stan. 2005. CODEX STAN 245 Página 1 de 6. :1–6.

Crippa A, Sydenstricker THD, Amico SC. 2007. Desempenho de filmes multicamadas em embalagens termoformadas. *Polímeros* 17:188–193.

Cuq B, Gontard N, Guilbert S. 1995. Edible films and coatings as active layers. *Act. food Packag.*:111–142.

Fakhouri FM, Fontes LCB, Gonçalves PVD, Milanez CR, Steel CJ, Collares-Queiroz FP. 2007. Filmes e coberturas comestíveis compostas à base de amidos nativos e gelatina na conservação e aceitação sensorial de uvas Crimson. *Ciência e Tecnol. Aliment.* 27:369–375.

Fakhouri FM, Queiroz FPC. 2009. Bioplásticos flexíveis e biodegradáveis à base de amido e gelatina. *Fac. Eng. Aliment.*:271.

FAO. 2014. Pérdidas y desperdicios de alimentos en América Latina y el Caribe. :10.

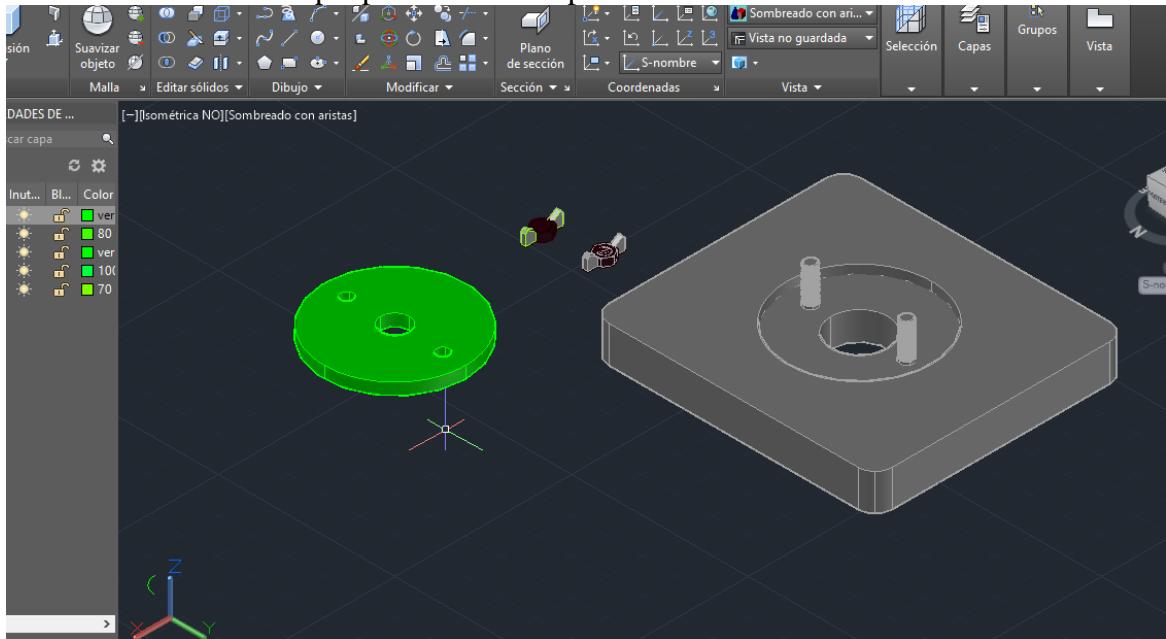
Farias MG, Fakhouri FM, Carvalho CWP de, Ascheri JLR. 2012. Caracterização físico-química de filmes comestíveis de amido adicionado de acerola (*Malpighia emarginata* D.C.). *Quim. Nova* 35:546–552. [consultado 2016 sep 14]. [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-40422012000300020&lng=en&nrm=iso&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422012000300020&lng=en&nrm=iso&tlng=pt)

- Ghidelli C, Mateos M, Rojas-Argudo C, Pérez-Gago MB. 2015. Novel approaches to control browning of fresh-cut artichoke: Effect of a soy protein-based coating and modified atmosphere packaging. *Postharvest Biol. Technol.* 99:105–113.
- Gontard N, Guilbert S, Cuq J-L. 1992. Edible Wheat Gluten Films: Influence of the Main Process Variables on Film Properties using Response Surface Methodology. *J. Food Sci.* 57:190–195.
- Gontard N, Guilbert S, Cuq JL. 1993. Water and glycerol as plasticizers affect mechanical and water vapor barrier properties of an edible wheat gluten film. *J. Food Sci.* 58:206–211.
- Lee JY, Park HJ, Lee CY, Choi WY. 2003. Extending shelf-life of minimally processed apples with edible coatings and antibrowning agents. *LWT - Food Sci. Technol.* 36:323–329.
- Lima ÁM, Cerqueira MA, Souza BWS, Santos ECM, Teixeira JA, Moreira RA, Vicente AA. 2010. New edible coatings composed of galactomannans and collagen blends to improve the postharvest quality of fruits - Influence on fruits gas transfer rate. *J. Food Eng.* 97:101–109.
- Lu R. 2004. Multispectral imaging for predicting firmness and soluble solids content of apple fruit. *Postharvest Biol. Technol.* 31:147–157.
- Mali S, Grossman M, García M, Martino MN, Zaritzky NE. 2008. Antiplasticizing effect of glycerol and sorbitol on the properties of cassava starch films. *Braz. J. Food Technol.* 11:194–200.
- Mendoza F, Aguilera JM. 2004. Application of image analysis for classification of ripening bananas. *J. Food Sci.* 69:471–477.
- Merino NI. 2015. Elaboración de queso Zamorella con almendras revestidas a base de almidones, proteína de suero de leche y glicerina.
- Moggia C, Pereira M. 2007. Boletín técnico. Pomáceas 7:1–4.
- Moncayo DC. 2013. Desarrollo de un recubrimiento comestible a partir de un biopolímero para prolongar la vida útil de frutas frescas.
- Monterrey ES, Sobral PJ do A. 2000. Preparo e caracterização de proteínas miofibrilares de tilápia-do-nilo para elaboração de biofilmes. *Pesqui. Agropecuária Bras.* 35:179–189. [consultado 2016 sep 29]. [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-204X2000000100020&lng=en&nrm=iso&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-204X2000000100020&lng=en&nrm=iso&tlng=pt)
- Muñoz JM. 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.
- Ochoa E, Charles A, Saucedo S, Aguilar C. 2009. INCREMENTO EN LA CALIDAD Y VIDA DE ANAQUEL DE MANZANAS RECUBIERTAS CON CERA NATURAL A BASE DE DOS COMPONENTES BIOACTIVOS. 2:208–212.

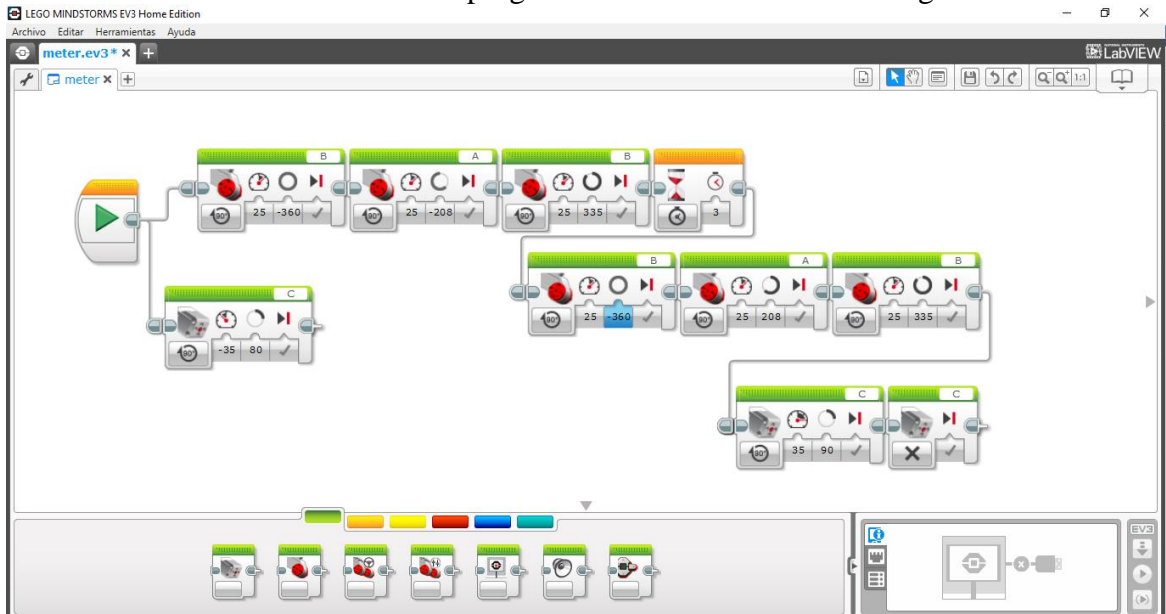
- Ozdemir M, Floros JD. 2008. Optimization of edible whey protein films containing preservatives for mechanical and optical properties. *J. Food Eng.* 84:116–123.
- Parzanese M. 2006. Tecnologías para la Industria Alimentaria - PELÍCULAS Y RECUBRIMIENTOS COMESTIBLES. *Minist. Agric. Ganad. y Pesca*:1–11.
- Pizato S, Cortez-Vega WR, Prentice-Hernández C, Borges CD. 2013. Efeito da aplicação de diferentes revestimentos comestíveis na conservação de maçãs “Royal Gala” minimamente processadas. *Semin. Agrar.* 34:253–264.
- Quintero CJ, Falguera V, Muñoz HA. 2010. Films and edible coatings : importance , and recent trends in fruit. *Rev. TUMBAGA* 5:93–118.
- Rocha GO. 2009. Obtencao e caracterizao de films biodegradáveis a partir de misturas de amido de amndioca e extrato protéico de soja. :45.
- Rocha GO, Farias MG, Carvalho CWP de, Ascheri JLR, Galdeano MC. 2014. Filmes compostos biodegradáveis a base de amido de mandioca e proteína de soja. *Polímeros* 24:587–595. [consultado 2016 sep 28]. [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0104-14282014000500011&lng=en&nrm=iso&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-14282014000500011&lng=en&nrm=iso&tlng=pt)
- Rojas-Graü MA, Soliva-Fortuny R, Martín-Belloso O. 2009. Edible coatings to incorporate active ingredients to fresh-cut fruits: a review. *Trends Food Sci. Technol.* 20:438–447.
- Ruano JA. 2009. Caracterização Físico-Química de Filmes Biodegradáveis de Farinha de Mandioca e Proteína de Soja por Extrusão. :86.
- Serrano MS. 2015. Solubilidad de la proteína de soya aislada tratada con alcalasa a pH ácido y sus propiedades funcionales.
- Shimazu AA, Mali S, Victória MVE. 2007. Efeitos plastificante e antiplastificante do glicerol e do sorbitol em filmes biodegradáveis de amido de mandioca Plasticizing and antiplasticizing effects of glycerol and sorbitol on biodegradable cassava starch films. *Semin. Ciências Agrárias* 28:79–88.
- Tapia-Blácido DR, Sobral PJA, Menegalli FC. 2010. Potential of *Amaranthus cruentus* BRS Alegria in the production of flour, starch and protein concentrate: Chemical, thermal and rheological characterization. *J. Sci. Food Agric.* 90:1185–1193.
- Vicentini NM. 2003. Elaboração E Caracterização De Filmes Comestíveis À Base De Fécula De Mandioca Para Uso Em Pós-Colheita.
- Villada H, Acosta HA, Velasco RJ. 2007. Biodegradables biopolymers naturals used in biodegradable. *Polymer (Guildf).* 12:5–13.

## 7. ANEXOS

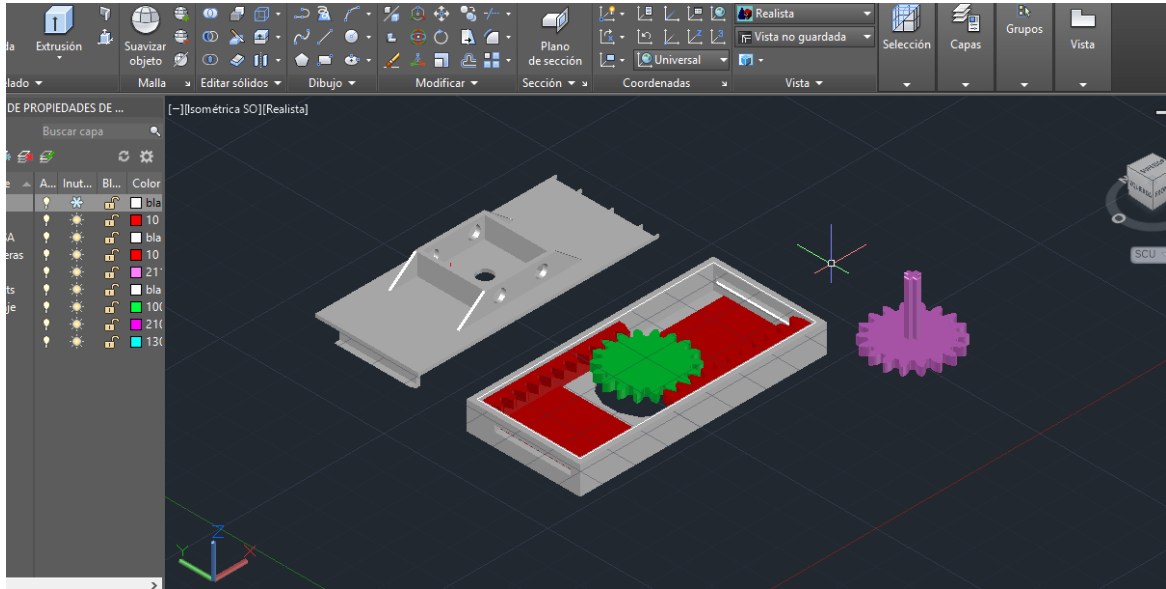
### Anexo 1. Diseño de acople para análisis de perforación en texturómetro



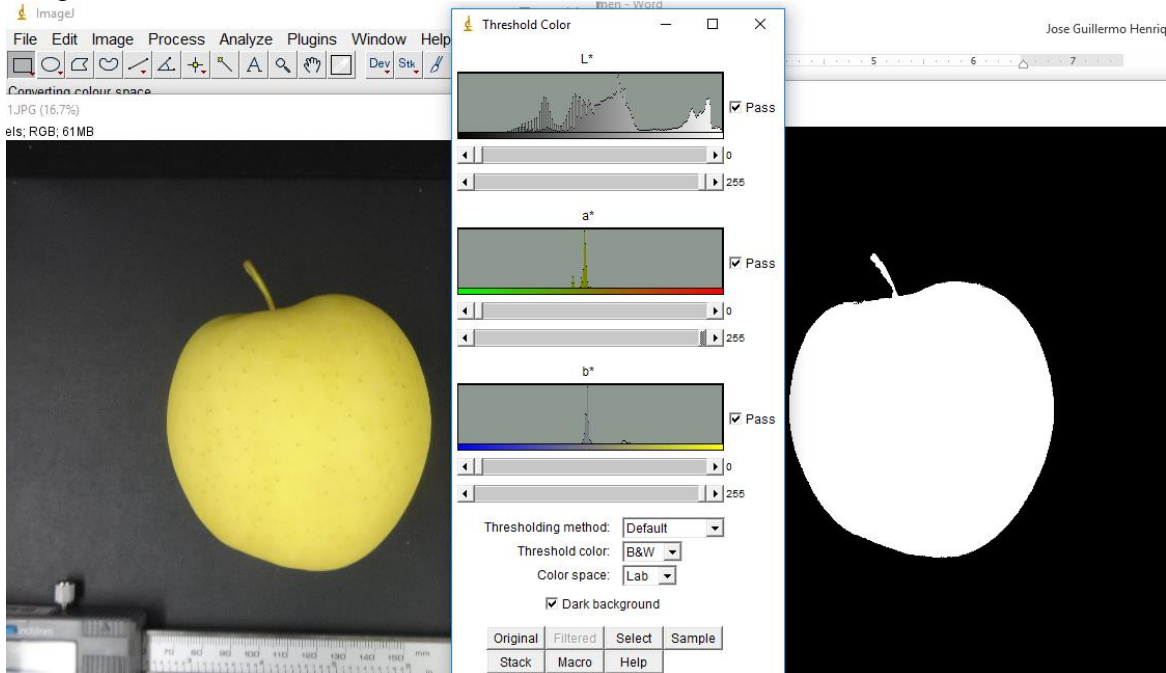
### Anexo 2. Secuencia utilizada en la programación de brazo robótico Lego Mindstorm



### Anexo 3. Diseño de acople para brazo robótico elaborado en AUTOCAD® 2016.



### Anexo 4. Binarización de imágenes para posterior análisis de superficie con software ImageJ



**Anexo 5.** Porcentaje de superficie en buen estado de manzanas Golden Delicious revestidas con biopolímero de proteína de soya, almidón de yuca y sorbitol en vida anaquel acelerada.

Horas	Tratamiento <sup>¥</sup>	
	Control	Revestidas
0	100.00 ± 0.00 <sup>A</sup>	100.00 ± 0.00 <sup>A</sup>
20	19.22 ± 28.13 <sup>A</sup>	43.60 ± 22.20 <sup>A</sup>
23	14.96 ± 22.96 <sup>A</sup>	39.32 ± 22.31 <sup>A</sup>
28	4.80 ± 9.33 <sup>B</sup>	35.37 ± 25.05 <sup>A</sup>
34	0.55 ± 1.63 <sup>B</sup>	32.80 ± 26.06 <sup>A</sup>
50	0.00 ± 0.00 <sup>B</sup>	28.10 ± 25.86 <sup>A</sup>
75	0.00 ± 0.00 <sup>B</sup>	22.97 ± 25.67 <sup>A</sup>
100	0.00 ± 0.00 <sup>B</sup>	16.34 ± 20.80 <sup>A</sup>
<b>% Coeficiente de variación</b>		<b>38.47</b>
<b>R<sup>2</sup></b>		<b>0.96</b>

<sup>¥</sup>Medias con letra diferente en la misma fila son estadísticamente diferentes (P<0.05)

**Anexo 6.** Pérdida de peso (%) en el tiempo en manzanas Golden delicious recubiertas con biopolímero hecho de proteína de soya, almidón de yuca y sorbitol en vida anaquel acelerada.

Hora	Tratamiento ± DE <sup>¥</sup>	
	Revestida	Control
23	1.634 ± 0.204 <sup>A</sup>	1.557 ± 0.280 <sup>A</sup>
28	1.877 ± 0.230 <sup>A</sup>	1.830 ± 0.342 <sup>A</sup>
34	2.159 ± 0.270 <sup>A</sup>	2.181 ± 0.412 <sup>A</sup>
50	2.947 ± 0.394 <sup>A</sup>	3.099 ± 0.600 <sup>A</sup>
75	4.264 ± 0.591 <sup>A</sup>	4.968 ± 0.928 <sup>A</sup>
100	5.372 ± 0.767 <sup>A</sup>	5.953 ± 1.172 <sup>A</sup>
<b>% Coeficiente de variación</b>		<b>10.70</b>
<b>R<sup>2</sup></b>		<b>0.98</b>

<sup>¥</sup>Medias con distinta letra (fila) son estadísticamente diferentes (P<0.05)

DE: Desviación estándar