

Biopolímeros para uso agro industrial: Alternativa sostenible para la elaboración de una película de almidón termo plástico biodegradable



Biopolymers for agro-industrial uses: Manufacture of a biodegradable thermoplastic starch film as a sustainable alternative

Cornejo Reyes, Gerson Vladimir; Marinero Orantes, Edgar Antonio; Funes Guadrón, Carlos Renán; Toruño, Pedro José; Editor Académico Prof. Dr Carlos Alberto Zúniga-González

 Gerson Vladimir Cornejo Reyes
ceia.fmpues@ues.edu.sv
Universidad de El Salvador, El Salvador

 Edgar Antonio Marinero Orantes
edgar.marinero@ues.edu.sv
Universidad de El Salvador, El Salvador

 Carlos Renán Funes Guadrón
carlos.funes@ues.edu.sv
Universidad de El Salvador, El Salvador

Pedro José Toruño
pjoseito@ev.unanleon.edu.ni
Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, León.,
Nicaragua

Editor Académico Prof. Dr Carlos Alberto Zúniga-González
Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua,
León. Escuela de Ciencias Agrarias y Veterinarias.
Departamento de Agroecología. , Nicaragua

Revista Iberoamericana de Bioeconomía y Cambio Climático

Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, León, Nicaragua
ISSN-e: 2410-7980
Periodicidad: Semestral
vol. 6, núm. 11, 2020
czuniga@ev.unanleon.edu.ni

Recepción: 17 Marzo 2020
Aprobación: 23 Julio 2020

URL: <http://portal.amelica.org/ameli/jatsRepo/394/3941758005/index.html>

DOI: <https://doi.org/10.5377/ribcc.v6i11.9824>

Autor de correspondencia: ceia.fmpues@ues.edu.sv

Copyright (c) 2020 Revista Iberoamericana de Bioeconomía y Cambio Climático

Resumen: El presente trabajo se realizó para generar una alternativa sostenible en la producción de bioplásticos para usos agroindustriales, aprovechando cultivos de El Salvador tales como papa (*Solanum tuberosum*) y yuca (*Manihot esculenta* Crantz) ricos en almidón, modificando la estructura molecular por procesos térmicos y químicos para obtener un almidón termoplástico capaz de ser moldeable como película biodegradable y ser mezclado como biocompuesto. Esto con el objetivo de mitigar la contaminación por plásticos petroquímicos con altas emisiones de gases de efecto invernadero y daños directos a la biodiversidad, puesto que la dinámica de crecimiento poblacional ha conllevado el arraigo por factores socio-económicos y culturales al uso desmedido de plásticos, demanda que incrementará paralelamente con la producción de alimentos.

Palabras clave: Biopolímero, Bioplástico, Biodegradabilidad, Bioeconomía, Biocompuesto.

Abstract: The present work aims to generate a sustainable alternative for the production of bioplastics as a proposal for Agroindustrial uses, taking crops from El Salvador such as potato (*Solanum tuberosum*) and Mandioca (*Manihot esculenta* Crantz) rich in starch, modifying the molecular structure by thermochemical process for obtain a thermoplastic starch capable to be moldable as a biodegradable film and be blended as a biocomposite. This with the objective to mitigate the pollution originate for petrochemical plastic with a high emissions of greenhouse gases and direct effects to the biodiversity, since the population growth dynamics has led the use excessive of plastics for culture and socio-economic factors, demand that will increase parallel with the food production.

Keywords: Biopolymer, Bioplastic, Biodegradability, Bioeconomy, Biocomposite.



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

INTRODUCCIÓN

Los plásticos han logrado establecerse en el día a día de las personas hasta llegar a ser imprescindibles, por ser una tecnología de bajo costo con gran estabilidad química a un enorme espectro de compuestos químicos. Por esta razón, son utilizados para la conservación en diferentes empaques y envases para el sector alimentario, sector agropecuario, sector salud, sector industrial etc.

También en el sector alimentario y agrícola los plásticos se han implementado en la producción de: bolsas, pajillas, cubiertos, envases de agroquímicos, plantines, films, cintas de riego, insumos agropecuarios entre otros; los cuales por su alto peso molecular se mantienen inalterable alcanzando un período de degradación aproximado de 100 a 200 años dependiendo de sus propiedades químicas. Estos tipos de plásticos generan una preocupación por la contaminación visual, contaminación por gases de efecto invernadero, componentes altamente carcinógenos, contaminación de la biodiversidad marina y los distintos recursos naturales del planeta.

La contaminación del planeta nos obliga a desarrollar alternativas sostenibles de producción para la conservación y el uso sostenible de los recursos naturales, con el aprovechamiento de materias primas. Esto a raíz de las altas cantidades de energía, recursos y agua necesarios para reciclar los plásticos por los remanentes químicos agrícolas y alimentarios. Además, son dispuestos en su mayoría en rellenos sanitarios que aumentan en tamaño y cantidad en relación al crecimiento poblacional cada año, lo que a su vez origina contaminación de acuíferos por lixiviados y emanación de gases de efecto invernadero.

En El Salvador la industria plástica ha logrado desarrollarse y se encuentra establecida por inversiones externas en su mayoría en lo referido a: Procesos de moldeo por inyección, moldeo por termo formación, extrusión de películas e impresión flexográfica, etc. Estas fueron responsables en el año 2017 del 19.9 % de las exportaciones compuesto por los esbozos de envases para bebidas, de empaques plásticos con una participación de 18.9 % y las bolsas plásticas con 17.4 %. Así mismo, en cuanto a las importaciones, estas ascendieron a \$687.5 millones (un crecimiento de 4.8 %) y el 17 % de las compras correspondientes a polímeros de etileno en formas primaria (Ibarra, 2018).

Por otra parte, la mayoría de empresas dedicadas al plástico basan sus modelos de negocios, en un sistema en el que utilizan polímeros petroquímicos con un modelo de economía circular logrando reciclar 11, 000 toneladas para el año 2014 y 14,500 toneladas para el año 2017, como parte de su responsabilidad social empresarial (Ibarra, 2018). Sin embargo, muy poca cantidad de todos los desechos plásticos es reciclada, y con base al informe del estado de los recursos naturales de El Salvador para el año 2017 emitido por el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, (MARN, 2017) reporta una producción total de 3,798.5 ton/día de desechos sólidos en áreas urbanas.

De igual manera, utilizan aditivos en su matriz polimérica para lograr una descomposición controlada, tal es caso de d2w una patente que permite la oxo-biodegradabilidad de los plásticos convencionales en el medio ambiente por una combinación de procesos de oxidación y biodegradación acorde con la normativa American Standard D6954-18 ASTM, considerando así que la mayor parte del carbono petroquímico será secuestrado por los organismos vivos y por lo tanto se recicla en el ecosistema (Symphony, 2018)

NOTAS DE AUTOR

ceia.fmpues@ues.edu.sv

REVISIÓN DE LITERATURA

Los plásticos se fragmentan en pedazos más pequeños y pueden incluso degradarse a residuos invisibles a simple vista. Si bien se asume que los productos de la degradación eventualmente se bio degradarán, no hay datos para documentar la biodegradabilidad completa definiéndose ésta como la degradación causada por microorganismos como bacterias, hongos, levaduras y algas que producen enzimas, las cuales provocan cambios químicos en la estructura del material, convirtiéndolo en productos simples como agua y dióxido de carbono dentro de un período de tiempo razonablemente corto (Thompson, et al. 2004, citado por Song, et al. 2009; Gálvez, 2016).

En ese mismo sentido, el tiempo de biodegradación es variable, dependiendo de los materiales que se utilicen y de la cantidad, pero en promedio se puede empezar a utilizar el producto de este proceso, a partir de unas pocas semanas o meses de un año (Quiñonez, 2015).

A nivel mundial, las reservas de recursos fósiles como petróleo, carbón y gas natural son limitadas y se prevé su agotamiento, sin mencionar que son una de las causas principales de los gases de efecto invernadero. El incremento en la concientización del impacto ambiental que tiene la comida y los residuos del empaquetado particularmente, generan una preocupación sobre el cambio climático y la disponibilidad de

agua. Así pues, en Brasil el consumo aparente de residuos plásticos fue aproximadamente 4 millones de toneladas en el 2000 aumentando a 6,2 millones en 2010 cerca de un 56.3% (Song, et al. 2011; Oliveira, et al. 2014; Vásquez, 2016).

Fue evidente entonces, que la propuesta de generar un sistema de producción de base biológica y sostenible surge debido a que los envases desechados son una fuente de desperdicios, lo que representa un gran desafío para el manejo de desechos en su disposición de rellenos sanitarios (Barnes et al. 2009 ; Gregory 2009 ; Oehlmann et al. 2009; Ryan et al. 2009 ; Teuten et al . 2009 ; Thompson et al. 2009 a , b citado por Song et al. 2009), lo cual no se encuentra acorde a un modelo de bioeconomía debido a que existen fallas en el diseño del producto que no permite aprovechar los residuos en un subproducto con valor agregado.

Resultado oportuno señalar, que diferentes países como India, Inglaterra, Malasia, Estados Unidos, Canadá y Brasil han destinado recursos en sus diferentes universidades, institutos de desarrollo de materiales y departamentos relacionado con las ciencias alimentarias, para el desarrollo de alternativas sostenibles de biopolímeros, bioplásticos o plásticos verdes con alta biodegradabilidad o compostables basados en materias primas renovables y base biológica con plastificantes no acuosos como medida para mitigar el cambio climático y los daños directos ocasionados por los plásticos petroquímicos a la biodiversidad y la salud pública (Pramanik et al. 2015; Song et al 2009; Song et al. 2011; Nafchi et al. 2013).

Se demuestró entonces, que los plásticos puede ser biodegradados específicamente por compostaje si estos sufren un proceso de oxidación y descomposición biológica que permite alterar químicamente los constituyentes de la materia orgánica pudiendo colocarse el material en contenedores metálicos o no por un período de tiempo de doce semanas, a una temperatura de 60°C por 3 días y 58°C por 14 a 21 días en adelante reduciendo el volumen de 30 a 60% por la generación de gases altamente volátiles (Gálvez, 2016; Greene, 2015; Quiñonez, 2015).

De ese mismo modo, a nivel centroamericano Nicaragua, Guatemala y Panamá han realizado investigaciones para la obtención y elaboración de un biopolímero plástico a partir de recursos como el almidón de malanga (*Colocasia esculenta*), almidón de maíz (*Zea mays*) y cascara de plátano como recursos renovables y biodegradables. Estos alcanzaron casi un 100% de biodegradabilidad de los almidones

termoplásticos a raíz de que pueden llegar a ser nutrientes en el ciclo de vida de muchos microorganismos, por lo que son compatibles con el ambiente y puede ser incorporado al sistema suelo como fertilizante orgánico (Nafchi et al. 2013; Oliveira et al. 2014; Castillo et al 2015; Offiong y Ayodele, 2016; Rosales 2016 Arévalo et al. 2018).

Así mismo, en El Salvador son pocas las investigaciones exploratorias sobre bioplásticos una de ellas fue llevada a cabo por la escuela especializada de ingeniería ITCA-FEPADE orientada a la obtención de un polímero biodegradable a partir de almidón de maíz (Quiñonez 2015). Así como biopelículas comestibles a partir de almidón de Sorgo (*Sorghum bicolor L.*) y yuca (*Manihot esculenta*) para preservar alimentos cortados como moras y fresas evaluando las propiedades fisicoquímicas y sensoriales con el fin de evitar la oxidación en la vida de anaquel y preservar las propiedades nutricionales y organolépticas del alimento (Arévalo et al. 2018). Sin embargo, esta última investigación fue desarrollada para generar un recubrimiento a ser aplicado a los alimentos y no como alternativa de empaque alimentario específicamente

También, en El Salvador se cuenta con cultivos ricos en almidón entre los que se pueden mencionar: yuca (*Manihot esculenta Crantz*), oteo (*Xanthosoma violaceum y hoffmanii*), Malanga (*Colocasia esculenta Schott*) y el ñame (*Dioscorea alata, capillaris, composita, esurientiu, macrostachya, salvadorensis, tuerckheimii, violácea*) camote o papa dulce (*Ipomoea batata*), entre otros; los cuales pueden ser cultivos potenciales para el procesamiento de productos sin comprometer la sostenibilidad alimentaria. Es decir, sin disminuir la oferta de cierto cultivo que está destinado como alimento para otros fines (Calderón, 1900; Hernández, 1997).

agua. Así pues, en Brasil el consumo aparente de residuos plásticos fue aproximadamente 4 millones de toneladas en el 2000 aumentando a 6,2 millones en 2010 cerca de un 56.3% (Song, et al. 2011; Oliveira, et al. 2014; Vásquez, 2016).

Fue evidente entonces, que la propuesta de generar un sistema de producción de base biológica y sostenible surge debido a que los envases desechados son una fuente de desperdicios, lo que representa un gran desafío para el manejo de desechos en su disposición de rellenos sanitarios (Barnes et al. 2009 ; Gregory 2009 ; Oehlmann et al. 2009; Ryan et al. 2009 ; Teuten et al. 2009 ; Thompson et al. 2009 a , b citado por Song et al. 2009), lo cual no se encuentra acorde a un modelo de bioeconomía debido a que existen fallas en el diseño del producto que no permite aprovechar los residuos en un subproducto con valor agregado.

Resultado oportuno señalar, que diferentes países como India, Inglaterra, Malasia, Estados Unidos, Canadá y Brasil han destinado recursos en sus diferentes universidades, institutos de desarrollo de materiales y departamentos relacionado con las ciencias alimentarias, para el desarrollo de alternativas sostenibles de biopolímeros, bioplásticos o plásticos verdes con alta biodegradabilidad o compostables basados en materias primas renovables y base biológica con plastificantes no acuosos como medida para mitigar el cambio climático y los daños directos ocasionados por los plásticos petroquímicos a la biodiversidad y la salud pública (Pramanik et al. 2015; Song et al 2009; Song et al. 2011; Nafchi et al. 2013).

Se demuestró entonces, que los plásticos puede ser biodegradados específicamente por compostaje si estos sufren un proceso de oxidación y descomposición biológica que permite alterar químicamente los constituyentes de la materia orgánica pudiendo colocarse el material en contenedores metálicos o no por un período de tiempo de doce semanas, a una temperatura de 60°C por 3 días y 58°C por 14 a 21 días en adelante reduciendo el volumen de 30 a 60% por la generación de gases altamente volátiles (Gálvez, 2016; Greene, 2015; Quiñonez, 2015).

De ese mismo modo, a nivel centroamericano Nicaragua, Guatemala y Panamá han realizado investigaciones para la obtención y elaboración de un biopolímero plástico a partir de recursos como el almidón de malanga (*Colocasia esculenta*), almidón de maíz (*Zea mays*) y cascara de plátano como recursos renovables y biodegradables. Estos alcanzaron casi un 100% de biodegradabilidad de los almidones

termoplásticos a raíz de que pueden llegar a ser nutrientes en el ciclo de vida de muchos microorganismos, por lo que son compatibles con el ambiente y puede ser incorporado al sistema suelo como fertilizante orgánico (Nafchi et al. 2013; Oliveira et al. 2014; Castillo et al 2015; Offiong y Ayodele, 2016; Rosales 2016 Arévalo et al. 2018).

Así mismo, en El Salvador son pocas las investigaciones exploratorias sobre bioplásticos una de ellas fue llevada a cabo por la escuela especializada de ingeniería ITCA-FEPADE orientada a la obtención de un polímero biodegradable a partir de almidón de maíz (Quiñonez 2015). Así como biopelículas comestibles

a partir de almidón de Sorgo (*Sorghum bicolor* L.) y yuca (*Manihot esculenta*) para preservar alimentos cortados como moras y fresas evaluando las propiedades fisicoquímicas y sensoriales con el fin de evitar la oxidación en la vida de anaquel y preservar las propiedades nutricionales y organolépticas del alimento (Arévalo et al. 2018). Sin embargo, esta última investigación fue desarrollada para generar un recubrimiento a ser aplicado a los alimentos y no como alternativa de empaque alimentario específicamente

También, en El Salvador se cuenta con cultivos ricos en almidón entre los que se pueden mencionar: yuca (*Manihot esculenta* Crantz), otoo (*Xanthosoma violaceum* y *hoffmanii*), Malanga (*Colocasia esculenta* Schott) y el ñame (*Dioscorea alata*, *capillaris*, *composita*, *esurientiu*, *macrostachya*, *salvadorensis*, *tuerckheimii*), violácea camote o papa dulce (*Ipomoea batata*), entre otros; los cuales pueden ser cultivos potenciales para el procesamiento de productos sin comprometer la sostenibilidad alimentaria. Es decir, sin disminuir la oferta de cierto cultivo que está destinado como alimento para otros fines (Calderón, 1900; Hernández, 1997).

Polímeros

Los polímeros son moléculas lineales o ramificadas formada por la repetición indefinida de grupos funcionales (monómeros) unidos por polimerización clasificándose en termoplásticos, termoestables y elastómeros. Los termoestables son polímeros que sufren una transformación química al ser sometidos a calor y sus moléculas crean una red tridimensional los cuales no pueden moldearse una vez se han solidificado; los elastómeros son polímeros con una estructura con mayor espacio entre moléculas y con propiedades elásticas entre los que podemos mencionar el caucho, el hule, etc. Sin embargo, los polímeros termoplásticos si pueden moldearse más de una vez por lo que esta propiedad les confiere el nombre de plásticos (Oliveira et al. 2014; Sánchez, 2015).

En efecto, los polímeros termoplásticos se caracterizan por tener una alta resistencia y baja densidad, permite el aislamiento térmico, eléctrico y una resistencia a los ácidos y álcalis. Así pues, se descubrió que el gas etileno polimerizaba a específicas condiciones de temperatura y presión generando un polímero que denominaron Polietileno (PE), posterior a ello se desarrolló del Polivinilo de Cloro (PVC) al remplazar un átomo de hidrogeno por uno de cloro, con ello y con el bajo costo que propicio el uso de combustibles fósiles se priorizó la producción de polímeros plásticos surgiendo el polipropileno (PP), el tereftalato de polietileno (PET), poliestireno (PS) entre otros (Sánchez, 2015; Vásquez, 2016).

En el mismo orden, en la industria petroquímica se obtienen los gránulos o “pellet” de plásticos diversos para luego ser utilizados en empresas de mezclado de distintos plásticos o con partículas. Estos pellets plásticos corresponden a la forma principal de las resinas que son producidas y comercializadas. Los pellets pueden llegar a ser de varias formas ovoides, esféricas o cilíndricas con tamaños de 1 a 5 mm generalmente blancas o transparentes en función de su composición química y propósito ulterior (Sanchez, 2015). Al fundirse y moldearse estas resinas en forma de pellets se pueden fabricar los artículos plásticos utilizados diariamente en el hogar o en actividades industriales, químicas etc.

Existen diferentes procesos de degradación que sufren los polímeros entre los que se pueden mencionar:

Foto degradación: Se producen cambios físicos y químicos en el polímero a partir de la exposición a la luz ultravioleta o luz visible. Todos los plásticos fósiles o de base biológica sufren fotodegradación y usualmente se puede evidenciar cuando los artículos plásticos se vuelven quebradizos. Durante la exposición a radiación UV, se degradan las capas exteriores del material penetrando hacia el interior conforme avanza el proceso degradativo (Quiroz et al 2009). **Degradación mecánica:** La degradación mecánica es causada por los esfuerzos físicos a los cuales se somete el material ya sea por tensión, ruptura, golpes etc.

Degradación térmica: Se presenta por elevadas temperaturas y sufren cambios químicos sin la contribución de ningún otro factor, únicamente, por la energía térmica. Este valor puede variar mucho y estará relacionado al tipo de polímero plástico por lo que pueden encontrarse plásticos que se degradan a bajas temperatura y otros que soportan altas temperaturas utilizadas en la industria por su resistencia.

Degradación química: Esta puede ser hidrolítica, la causa de la degradación es el contacto del material con un medio acuoso; la penetración del agua dentro de la matriz polimérica produce el hinchamiento, ruptura de los puentes de hidrógeno intermoleculares, hidratación de las moléculas y, finalmente, la hidrólisis de los enlaces inestables (Mollinedo, 2017).

Oxodegradación–oxobiodegradación: Proceso de descomposición que sufren los plásticos que se les incorporan aditivos pro-oxidantes, procesos de copolimerización con monómeros que contengan grupos carbonilos, incorporación de enlaces hidrolizables dentro de las cadenas, incorporación de insaturaciones y otras más; con el fin de actuar como factores iniciadores de una foto-oxidación en la que se origina la fragmentación del polímero para facilitar el ataque microbiano posterior (Quiroz, 2009)

Biopolímeros

Los biopolímeros son macromoléculas formadas por unidades funcionales que han sido desarrollados por diferentes organismos de maneras directas o procesadas indirectamente. Los biopolímeros plásticos o bioplásticos son descritos como todos los plásticos que también son de base biológica o pueden ser biodegradables. Por lo cual existen polímeros plásticos que pudiesen ser biodegradables y compostables dependiendo de las propiedades químicas de sus componentes. Pueden elaborarse a través de carbohidratos (almidón, celulosa, azúcar de caña etc.), proteínas (gelatina, caseína, seda y lana), lípidos (aceites vegetales) y otros grupos funcionales para formar: Ácido poliláctico-PLA, poliésteres como los Polihidroxialcanoatos-PHA almidones termoplásticos entre otros (Song et al. 2009; Song et al. 2011; Pramanik et al. 2015; Vásquez 2016; Offiong y Ayodele, 2016).

Como puede observarse los lineamientos en la normativa ASTM-D6866 como método analítico estandarizado para determinar el contenido de base biológica de muestras sólidas, líquidas y gaseosas, utilizando la datación por radiocarbono (Vásquez, 2016; Beta Analytic, 2018).

Esto se logra medir por el carbono resultante de los compuestos formados de biomasa y el carbono derivado de insumos de origen fósil como el petróleo, ya que la biomasa contiene una cantidad bien caracterizada de carbono 14 que es fácilmente diferenciada de los combustibles fósiles (Narayan, 2006 a , b citado Song et al. 2009).

Así mismo, la normativa ASTM 5339-98, es un método de evaluación que determina el grado de la tasa de biodegradación aeróbica de materiales plásticos exponiéndolos a un ambiente de compostaje en ambiente controlado de condiciones de laboratorio. Las sustancias evaluadas son expuestas a un inóculo obtenido de un compostaje de desechos municipales (ASTM, 2003).

En el mismo orden de ideas, las normativas europeas EN 13432 y EN 14045 establecen que el material plástico a evaluar debe estar en un medio de compostaje con residuos orgánicos por un mínimo de 3 meses o 12 semanas y con un máximo de 6 meses. Tiempo en el cual el material evaluado debe alcanzar un 90% de biodegradabilidad con un porcentaje menor al 10 % y menor a 4 mm² de los fragmentos de residuos resultantes de la masa original (Wilde, 2002; European bioplastic, 2015).

Por lo tanto, es importante reconocer que no todos los materiales de polímeros de base biológica son biodegradables y viceversa. Igualmente, es importante reconocer que los atributos como la biodegradabilidad de un polímero dado deben combinarse de manera efectiva con el manejo adecuado de los desechos para capturar el máximo beneficio ambiental. Para los productos duraderos en los que la biodegradabilidad no es un elemento requerido por razones de rendimiento, seguridad y vida útil del producto, se deben identificar métodos alternativos de eliminación de desechos a energía o reciclaje (Song et al 2009).

Almidón

La principal ventaja del almidón es que cada célula de la mayoría de plantas tienden a almacenarlo en estructuras denominadas amiloplastos y estos pueden ser más abundantes dependiendo de la especie de planta o cultivo por lo que se considera abundante y renovable, en comparación con los materiales poliméricos la desventaja es que tiene grupos hidroxilos que le permite ser soluble en agua por lo que se disuelve el compuesto en unidades básicas (Nafchi et al. 2013).

Cabe agregar, que el almidón es un polímero natural compuesto por carbono, hidrogeno y oxígeno en una proporción de 6:10:5 (C₆ H₁₀ O₅)_n (Vásquez 2016). Pertenece a la clase de los carbohidratos compuesto por unidades de anhidroglucosa ligadas por enlaces α -D glucosídicos que establecen una estructura de cadena lineal de amilosa y amilopectina (Offiong y Ayodele, 2016).

Así pues, se pueden establecer los siguientes porcentajes de almidón para diversos cultivos: maíz puede alcanzar hasta un 28%, centeno 27%, trigo 23-27%, tapioca o yuca 18-23%, papa 20% (FAO, 1997;

BeMiller et al. 2009 citado por Ruiloba et al. 2018). El almidón extraído de la papa puede presentar un 26,21% de amilosa y 73,79% de amilopectina, el cual podría cambiar según la variedad del cultivo (Meza et al. 2019)

Además, los enlaces glucosídicos se forman por conexiones carbono 1 de las moléculas con el carbono 4 de otra molécula de glucosa lo que permite formar una cadena interconectada El almidón puede presentar formas ya sea elíptico, oval o poligonal lenticular y esto se encuentra relacionado por los tipos de almidón tipo A (cereales) tipo B (raíces) y tipo C (leguminosas) con una estructura molecular semicristalina. Su tamaño puede variar entre 1 micras hasta 100 micras estableciendo así que el almidón de papa posee un tamaño entre 15 a 100 micras, el de maíz 15 micras de 15 micras (Nafchi et al. 2013). Así pues, puede aprovecharse el almidón de diferentes materias primas como lo es el almidón de las semillas de mango para lo cual, es necesario aislar el almidón de otras sustancias sin interés por procesos de laboratorio (Ruiloba et al. 2018).

Plastificantes

El plastificante es una sustancia normalmente líquida y de viscosidad mayor a la del agua que se adiciona a la mezcla con el fin de mejorar la flexibilidad del material mediante la reducción de las fuerzas intermoleculares (Astioli et al. 1994 y Santos et al. 2005 citados por Enríquez et al. 2012). El almidón posee pobres propiedades mecánicas, reológicas, térmicas y es muy soluble en agua debido por fuerzas intermoleculares e intramoleculares mediante puentes de hidrogeno y grupos hidroxilo libres a reaccionar en los almidones nativos. Estas propiedades pueden ser mejoradas al agregar plastificantes tales como polivinil de alcohol, glicerol, ácidos carboxílicos, sorbitol, propilenglicol, etilenglicol, polietilenglicol, trietil citrato, triacetina formamidas, urea, acetamida, azúcar, polioaminoácidos, lípidos, sorbatos y fosfatos entre otros (Nafchi et al. 2013; Pramanik et al. 2015; Offiong y Ayodele, 2016).

Con relación a lo expuesto anteriormente, los plastificantes solubles en agua como el glicerol son efectivos como agentes suavizantes para los almidones, mejorando la flexibilidad de las películas resultantes. Cuanto más se incluye una sustancia plastificante en una matriz polimérica, la elongación y la deformación aumentan (Otey y Wethoff, 1979; Díaz et al. 2007 citado por Enríquez et al. 2012).

Almidones termoplásticos

El almidón sufre una desestructuración o modificación física del estado granular al someterlo al calor, para lo cual existe una temperatura critica para interactuar con un plastificante: Esto posibilita que los grupos hidroxilos reaccionen generando puentes de hidrogeno lo que posibilita que las cadenas se muevan libremente de manera individual perdiendo la semicristalinidad de su estructura generando los almidones termoplásticos (Shogren et al. 1970 citado por Nafchi et al. 2013; Offiong y Ayodele, 2016).

Fue evidente entonces, que los almidones termoplásticos se estima que alcanza el 50% de los bioplásticos del mercado (Pramanik et al. 2015). Estudios han mostrado que el almidón puede ser modificado por esterificación, eterificación y oxidación antes de su ser moldeado para lograr un alto grado de sustitución de los grupos hidroxilos (Nafchi et al. 2013).

La glicerina es un plastificante prometedor utilizado en la formulación de almidones termoplásticos, es un alcohol con tres grupos hidroxilo que le permiten ser soluble en agua. Le proporciona al bioplástico un aspecto morfológico suave y uniforme. Reduce la resistencia a la tracción y mejora la capacidad elástica del bioplástico, si se añade en cantidades superiores al 25% (Gálvez, 2016).

Además, al aumentar la temperatura el almidón atraviesa por una transición vítrea característico de un material polimérico, la cual se refiere al cambio inducido por el calor sobre las características de un

polímero, ocasionado la rigidez en las cadenas, entrecruzamiento de cadenas y presencia de cristales, así como incremento de las secciones amorfas reflejándose en un estado más sólido, frágil y quebradizo del almidón termoplástico (Mollinedo, 2017). La incorporación de almidón en las películas de PVA (Polivinilo de alcohol) mejora significativamente la biodegradación y desintegración de las mismas (Devís, 2015) por lo que puede utilizarse en mezclas con otros polímeros para mejorar sus propiedades reológicas y permitir una mayor biodegradación de las resinas termoplásticas convencionales

Materiales y métodos

El estudio fue enfocado como una investigación exploratoria probando diferentes formulaciones, con el fin de desarrollar un prototipo de película biodegradable de almidón termoplástico elaborado con almidón de yuca (*Manihot esculenta* Crantz) y papa (*Solanum tuberosum*). Estos fueron adquiridos por venta comercial grado alimentario procesados de cultivos de la región por lo que son considerados como

almidones nativos; es decir, sin alteración molecular significativa y distribuidos como aditivos alimentarios con sistema certificado HACCP UL Management Systems Solutions. Así también, se utilizó agua destilada, glicerol y ácido acético glacial grado químico adquirido por droguería y laboratorios FALMAR S. A. de C. V. en presentación de 1 gal, 1 kg y 1 l respectivamente. La investigación fue llevada a cabo en mayo de 2018 hasta agosto de 2018 en el Centro de Investigación Ambiental de la Universidad de El Salvador en las siguientes coordenadas 13°38'09"N y 88°47'12" O, como parte de una iniciativa de innovación en el sector agroindustrial de la región.

La tabla 1 muestra las diferentes formulaciones basadas en investigaciones previas realizadas en otras regiones, así como por método de prueba y error, con el fin de realizar un acercamiento exploratorio del material y establecer el comportamiento de cada materia prima en el proceso de elaboración de almidones termoplásticos.

Tabla 1: Formulaciones para elaborar almidones termoplásticos propuestos para ambas materias primas.

Formulaciones AA 3% G Ad Al F1 5 ml 3 ml (3.78g) 30 ml 10 g F2 5 ml 5 ml (6.3 g) 60 ml 10 g F3 20 ml 20 ml (25.2 g) 240 ml 40 g F4 10 ml 10 ml (12.6 g) 80 ml 20 g F5 15 ml 10 ml (12.6 g) 240 ml 30 g F6 15 ml 9 ml (11.34 g) 150 ml 30 g F7 10 ml 6 ml (7.56 g) 120 ml 20 g F8 10 ml 5 ml (6.3 g) 97 ml 20 g Import table

Fuente: Elaboración propia.

AA: ácido acético glacial; Al: Almidón de yuca y papa. G: Glicerol o glicerina, utilizado como agente plastificante; Ad: Agua destilada, utilizado como agente plastificante;

Para estandarizar el proceso de pesado de cada una de las formulaciones de los prototipos de biopelículas de almidones termoplásticos se utilizó equipo de pesaje Shimadzu balanza serie BL620S con un capacidad máxima y mínima de lectura de 60 g y 0.01 g con un error de pesaje de 0.01 g. El almidón de yuca (*Manihot esculenta* Crantz) obtenido es diferente en apariencia que el almidón de papa (*Solanum tuberosum*) como puede consultarse en la figura 1 y figura 2. Se procedió a pesar las cantidades de almidón y fue sometido a 100 ml de agua con 3% de ácido acético romper las cadenas de amilosa y amilopectina de los gránulos de almidón y alterar la estructura semicristalina para poder ser moldeable como puede evidenciarse en la figura 3.

Figura 1: Almidón de yuca (*Manihot esculenta* Crantz) nativo o sin tratamiento previo alguno. Import table
Figura 3: Almidón disuelto en 100 ml de solución de ácido acético glacial al 3 % y agua destilada. Import table
Figura 2: Almidón de papa (*Solanum tuberosum*) nativo o sin tratamiento previo alguno. Import table

Posterior a ello se procedió al homogenizado de la mezcla de almidón y ácido acético con el glicerol y el agua restante utilizando agitadores hasta lograr que la mezcla sea uniforme. Se procedió a calentar la mezcla y registrar 60 °C hasta alcanzar el punto de gelatinización de la mezcla para cada una de las formulaciones como puede notarse en la figura 4. Las mediciones fueron realizadas con un termómetro infrarrojo W89724 que posee un rango de temperatura de -50 a 750 ° C, con un rayo de 630 a 650 nm y un error de medición de +2.7°F o +1.5°C.

Como paso siguiente, se moldeó la mezcla de almidón termoplástico en bandejas de acero inoxidable con un área de 910 cm², con el fin de generar la forma de película lo más delgada posible. Posterior a ello se dejó

secar por 3 días a temperatura ambiente entre 26 a 32 °C, seguido de una estabilización por 15 días para asegurar que el material no se retrograde o exista migración hacia el ambiente de los plastificantes de la mezcla.

Figura 4: Mezcla gelatinizada de almidón termoplástico lista para moldearse en película. Import table
 Figura 6: Biopelícula de almidón termoplástico de yuca (*Manihot esculenta* Crantz). Import table
 Figura 5: Biopelícula de almidón termoplástico-. Import table

Figura 8: Elaboración de sachetz como alternativas al empaqueo alimentario elaborados a partir de almidones termoplásticos. Import table
 Figura 7: Biopelícula de almidón termoplástico de papa (*Solanum tuberosum*). Import table
 El las figuras 5, 6 y 7 se puede apreciar las biopelículas de almidón termoplástico obtenidas al finalizar el proceso y como parte de los posibles usos como alternativa al empaqueo alimentario y agropecuario se procedió a elaborar sachetz o sobrecitos de almidones termoplásticos conteniendo sal o azúcar como se muestra en la figura 8, lo que podría disminuir el uso de plásticos de un solo uso que generan la problemática ambiental y de salud humana presente a día de hoy.

Figura 9: Lectura de grados Brix de la mezcla gelatinizada de almidón termoplástico. Import table
 Figura 11: Observación de las biopelículas de almidón de papa (*Solanum tuberosum*). Import table
 Figura 10: Observación de las biopelículas de almidón de yuca (*Manihot esculenta* Crantz). Import table

Cabe agregar que, fue utilizado un refractómetro ATC 0 a 32 °Brix con una precisión de 0.20 % con el fin de inferir el contenido de sólidos de cada una de las mezclas por refractometría como puede se puede evidenciar en la figura 9. Como siguiente paso se procedió a estudiar las biopelículas en el microscopio estereoscópico Luxeo 4d Labomed tal como se muestra en las figuras 10 y 11.

A continuación, se expone el diagrama de flujo en la figura 12, el cual fue diseñado para detallar en profundidad cada etapa, en el proceso de elaboración de biopelículas de almidón termoplástico de manera estandarizada; adaptando cada una de las formulaciones para ambos tipos de materia prima de interés propuestos.

Con base a lo establecido por la normativa EN 13432, se sometieron los prototipos de biopelícula de almidón termoplástico a un medio de compostaje por un mínimo y máximo de 3 a 6 meses, como método para evaluar la biodegradación en condiciones aeróbicas con temperatura ambiente entre 26 a 32°C; tal como se muestra en la figura 13, 14 y 15 para cada una de los almidones termoplásticos obtenidos ya sean flexibles o rígidos. Dicho medio se encuentra formado de desechos sólidos orgánicos junto con aserrín de madera descompuesto, tierra y alto contenido de organismos degradadores con un período de 5 a 6 meses de madurez con un 80 a 90% de humedad relativa.

Acidificación del almidón Import table
 Homogenizado Import table
 Cocción Import table
 Moldeado Import table
 Secado Import table
 Estabilización Import table
 Dilución del AA al 3% Import table
 El almidón es sometido a una solución de ácido acético al 3% por 10 minutos. Import table
 El ácido acético glacial es diluido en 97 ml de agua para disminuir su concentración al 3 % Import table
 Se miden las cantidades de agua destilada y glicerol para mezclar con la solución de almidón acidificado. Import table
 Se calienta la mezcla hasta entre 60 °C punto en el cual la mezcla comienza a aumentar su viscosidad. Import table
 La pasta obtenida de almidón termoplástico es esparcida en una bandeja de acero inoxidable. Import table
 El secado es realizado a temperatura ambiente entre un rango de 26 a 32 °C con humedad relativa no controlada por 3 días. Import table
 El material tiende a sufrir retrogradación por lo que es necesario dejar reposar por 15 días estabilizar los enlaces moleculares. Import table
 Figura 12: Diagrama de flujo para la elaboración de almidones termoplásticos (Elaboración propia). Import table

Ilustración 1 Biopelículas obtenidas vistas por el microscopio estereoscópico Import table
 Figura 14: Muestra de almidón termoplástico de papa (*Solanum tuberosum*) rígido obtenido por el bajo contenido de glicerol sometido a medio de compostaje. Import table
 Figura 15: muestra de prototipo de almidón termoplástico de yuca sometido a medio de compostaje. Import table
 Figura 13: Comparación de biodegradación de almidón termoplástico sometido a medio de compostaje junto con plástico convencional. Import table

El medio posee un área de un 1 m de ancho, 1 m largo y 0.5 m de profundidad, obteniendo un aproximado de 0.5 m³ de materia orgánica en descomposición, la cual era periódicamente monitoreada con intervalos de 1 día para cada control y tomar datos de la alteración de las biopelículas de almidones termoplásticos.

Discusión

Los prototipos elaborados con mayores cantidades de plastificante tienden a ser más flexible y por contraparte al disminuir la concentración de este en la formulación la biopelícula se vuelve más rígida tal como establece Enríquez et al. (2012), presentando valores entre 4 a 21 °Brix que se encuentran relacionados a esta propiedad del material.

En cuanto a la biopelícula, esta puede presentar una coloración blanquecina semitransparente y o café ligeramente, coincidiendo con lo publicado por Cuervo y Mosquera (2011) quienes consideran que, a mayor contenido de glicerol aumenta la transparencia de las películas, debido a que tiene mayor capacidad de retener agua en su estructura lo que facilita el paso de la luz.

Respecto a los métodos de moldeo, estos influyeron en la uniformidad de la matriz elaborada y la textura por lo que se presentó una cara de la biopelícula lisa y otra áspera, así mismo en el proceso de secado y estabilización el prototipo puede deformarse por las variaciones de temperatura y la humedad relativa evidenciada en la figura 16. La biopelícula sufre una retrogradación tal como menciona Nafchi et al. (2013) debido a que los plastificantes no logran incorporarse a la cadena de amilosa y amilopectina migrando hacia el ambiente desde la matriz, generando una sensación grasosa característica del glicerol agravándose en ambientes húmedos.

Al respecto, de las altas temperaturas en el proceso de gelatinización del almidón termoplástico, estas pueden generar burbujas ocasionando que la biopelícula no sea uniforme como se logra evidenciar en la figura 17. Además, estas biopelículas de almidón presentan una estructura semicristalina que podría indicar que los gránulos de almidón no lograron enlazarse con el plastificante, generando su recristalización tal como se muestra en la figura 18 y 19.

Figura 16 Deformación de los almidones termoplásticos obtenidos. Import table Figura 18 Estructura recristalizada de las biopelículas de almidones termoplásticos vista por el microscopio estereoscópico. Import table Figura 19 Estructura desordenada originada por la retrogradación del material vista en el microscopio estereoscópico. Import table Figura 17 Presencia de aberturas en las biopelículas por la generación de burbujas durante el proceso de cocción. Import table

Con respecto, a los prototipos sometidos a un ambiente de compostaje desde el 22 de julio de 2018 hasta al 30 de julio de 2018, se evidenció que fueron atacados por microorganismos que propician la descomposición, hasta alcanzar 3 semanas a 1 mes.

Como se puede notar en la figura 20 el material es altamente soluble y en la figura 21 se evidenciaron microorganismos tales como ácaros descomponedores de materia orgánica, posterior a ese tiempo el material se biodegrada, hasta el punto en el que no es posible ser reconocido con el material compostado similar a lo determinado por Meza et al. (2019) al utilizar la metodología ISO 17556-AENOR 2013, para la evaluación de biodegradabilidad sometiendo bioplástico, celulosa y polietileno de baja densidad a un medio de compostaje por 3 meses con 6 meses de degradación previo, registrando una biodegradabilidad de 64,21%, 63.51% y 6.95% respectivamente. Sin embargo, el material puede seguir biodegradarse hasta lograr incorporarse al ecosistema, así mismo los resultados se encuentra acorde a la normativa europea EN 13432 y a lo expuesto por Devís (2015). Por lo que se establece un período de 1 a 2 meses para la biodegradación en ambientes con altos contenidos en materia orgánica y humedad, así como 3 a 6 meses en ambientes con poca materia orgánica y baja humedad.

Figura 20 Prototipos atacados por microorganismos y descompuestos por la acción enzimática de estos y por el alto contenido de humedad. Import table Figura 21 Presencia de ácaros encontrados en los prototipos en biodegradación. Import table

En efecto, el almidón termoplástico no es posible sellarlo con selladoras de impulso, porque las cadenas de amilosa y amilopectina se desnaturalizan sin llegar a fundirse ambas capas. Para estimar el costo de elaboración de los almidones termoplásticos, se elaboró la tabla 2 que muestra la inversión en cada una de las materias prima.

Tabla 2: Costo de inversión en materias primas para la elaboración de almidones termoplásticos (Elaboración propia).

Materia Prima Costo con el uso mínimo de materias primas. Área Grosor Costo con el uso máximo de materias primas Glicerina 0.5 a 2 ml Ácido acético Agua Almidón Total \$0.097 dólares americanos. \$0.4975 dólares americanos Import table

Conclusiones

La alta descomposición exhibida en los prototipos de almidón termoplástico y la presencia de microorganismos degradadores tales como ácaros, comprueban que el almidón es un material biodegradable y por su abundancia es considerado una materia prima renovable. Por lo cual es necesario profundizar con cultivos ricos en almidón como: la malanga (*Colocassia esculenta*), el oteo (*Xanthosoma violaceum* y *hoffmanii*), el ñame (*Dioscorea alata*, *capillaris*, *composita*, *esurientiu*, *macrostachya*, *salvadorensis*, *tuerckheimii*) y el camote o papa dulce (*Impomoea batata*), como materias primas disponibles con alto potencial para ser una alternativa sin generar competencia al sistema alimentario, para ser utilizadas en la elaboración de empaques alimentario de un solo uso o insumos agropecuarios

Es necesario utilizar otros tipos de acidificantes y variar el tiempo de estos con el almidón para romper las cadenas de amilosa y amilopectina, así como utilizar diferentes tipos de plastificantes con el fin de disminuir la hidrofiliidad del material, para estabilizar la estructura molecular del almidón con el fin de evitar su recristalización.

Los bioplásticos son más caros en comparación con los plásticos petroquímicos convencionales respaldado por amplia literatura en el tema. Sin embargo, este valor es compensado por la menor cantidad de gases de efecto invernadero aprovechando el CO₂ proveniente de la biomasa, lo que permite restablecer un equilibrio basado en economía circular; así también, por las diferentes alternativas de reciclado o disposición de los residuos, ya sea por procedimientos aeróbicos o anaeróbicos.

Referencias bibliográficas

Arévalo-Alvarenga, Verónica Lissette; Azucena-Peña, Gerson Arnoldo, y Amaya-Laínez, Sandra Elisa. (2018). Formulación y caracterización de una biopelícula comestible elaborada a partir de almidón de sorgo (*Sorghum bicolor* (L) Moench) y Yuca (*Manihot esculenta*) (Tesis). Para optar al título de Ingeniero en Alimentos. Universidad de El Salvador. Pp. 304. <http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/15440>

ASTM 5338-98. (2003). Designation: D 5338 – 98 (Reapproved 2003) Standard Test Method for Determining Aerobic Biodegradation of Plastic Materials Under Controlled Composting Conditions. United States Pp. 6. <https://allcivilstandard.com/wp-content/uploads/2018/12/D-5338.pdf>

Beta analytic. (2004). ASTM D6866-18 Analizar el contenido de base biológica. Estados Unidos. S.ed. S. Trad. <https://www.betalabservices.com/espanol/base-biologica/astm-d6866.html> Consultado el 23.09.2018

Calderon, Stanley Paul. (1900) Repositorio digital de ciencia y cultura de El Salvador. 1a ed Biblioteca Nacional de El Salvador Francisco Gavidia. Pp. 277. <http://www.redicces.org.sv/jspui/bitstream/10972/1558/1/Lista%20Preliminar%20de%20las%20Plantas.pdf> Consultado 02.04.2020.

Castillo, Ruth; Escobar, Eliasury; Fernández, Dianeth; Gutiérrez, Ramón; Morcillo, Jonathan; Núñez, Neryana. y Peñazola, Sandra. (2015). Bioplástico a base de la cascara de plátano. Journal of Undergraduate Research. Revista de Iniciación Científica. Universidad Tecnológica de Panamá Pp. 4. <http://revistas.utp.ac.pa/index.php/ric/article/download/346/339> Consultado el 04.11.2018.

Cuervo-Pardo, Oscar Hernando y Mosquera-Velasco, Reinaldo. (2011). Propiedades fisicoquímicas y mecánicas de películas obtenidas a partir de almidón nativo y oxidado de arracacha Physicochemical and

mechanical properties of film obtained from native and oxidized arracacha starch. *Revista ION*, ISSN: 0120-100X Colombia. Pp 8. <https://www.redalyc.org/pdf/3420/342030285004.pdf>

Devís Peinado, M. (2015). Estudio de la biodegradabilidad y desintegración de películas a base de almidón y PVA que incorporan diferentes sustancias antimicrobianas. *Universitat Politècnica de Valencia- España*. Pp. 59. <http://hdl.handle.net/10251/56383>

Enríquez, Mario; Velasco, Reinaldo. y Ortiz, Vicente. (2012). Composición y procesamiento de películas biodegradables basadas en almidón. *Universidad del Cauca. Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*. Vol 10 No. 1 (182 - 192) <http://www.scielo.org.co/pdf/bsaa/v10n1/v10n1a21.pdf>

European bioplástico. (2015). EN 13432 certified bioplastics performance in industrial composition. Pp. 5. Berlín https://docs.european-bioplastics.org/publications/bp/EUBP_BP_En_13432.pdf Consultado el 05.04.2020

Gálvez- Arévalo, Ana Gabriela. (2016). Elaboración de plástico biodegradable a partir de almidón extraído del Maíz (*Zea mays*) (Trabajo de grado). Para optar al título de Ingeniera Química. Universidad San Carlos de Guatemala. Pp. 90. <http://www.repositorio.usac.edu.gt/5102/1/Ana%20Gabriela%20G%C3%A1lvez%20Ar%C3%A9valo.pdf>

Greene, Joseph. (2015). Degradation of biodegradable, UV-degradable and oxodegradable plastics in MSW in vessel Composting Environment. California State University, California, USA 95929-0789 Pp. 5. https://www.researchgate.net/publication/225587239_Biodegradation_of_Compostable_Plastics_in_Green_Yard-Waste_Compost_Environment

Hernández-Vásquez, Saturnnin. (1997) Inventario de recursos Fito genéticos nativos no tradicionales con importancia alimenticia en El Salvador. Repositorio institucional de la Universidad de El Salvador.

(Trabajo de grado). Para optar al título de Licenciado en Biología. <http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/18090/> Consultado el 29.11.2018. <https://www.researchgate.net/publication/266092188>

Ibarra, L. (2018). La industria plástica se transforma en El Salvador (página web). *El Economista*. Recuperado de: <https://www.economista.net/economia/La-industria-plastica-se-transforma-en-El-Salvador-20181123-0019.html>

Meza, Paola; Quipuzco, Lawrence y Meza, Victor. (2019). Elaboración de bioplásticos y determinación de su biodegradabilidad - Proyecto de laboratorio. *Rev. del Instituto de Investigación FIGMMG -UNMSM* Vol. 22 (43). Pp: 67 - 80 ISSN-L: 1561 - 0888 <https://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/iigeo/article/view/16691/14254>

Ministerio del Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN). (2017). Informe nacional del estado del medio ambiente, INEMA 2017. San Salvador, El Salvador. Centroamérica.

Mollinedo-Paíz, Edgar Leonel. (2017). Plástico biodegradable a partir de almidón de maíz; evaluando su degradabilidad con ácido sulfúrico y su expansión polimérica al variar la formulación (Trabajo de grado). Para optar al título de Licenciado en Química. Universidad San Carlos de Guatemala. Pp. 109. Pp. 109. Disponible en: <http://www.repositorio.usac.edu.gt/8059/1/Edgar%20Leonel%20Mollinedo%20Paiz.pdf> Consultado 04.11.2018.

Nafchi, Abdorreza Mohammadi; Moradpour, Mahdiyeh; SAEIDI, Maliheh. y Alias Abd Karim. (2013). Thermoplastic starches: Properties, challenges and prospects. *Islamic Azad University. Iran. Food Biopolymer Research Group, University Sains Malaysia*. Pp. 12. https://is.muni.cz/el/1431/podzim2013/C3804/Thermoplastic_starches__Properties__challenges__A_Review.pdf Consultado el 28.10.2018.

Offiong, Etom Udeme; y Ayodele, Sannin Lateef. (2016). Preparation and characterization of thermoplastic starch from sweet potato. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, Vol. 7. India. Pp. 6. Corpus ID: 212557163 <https://pdfs.semanticscholar.org/2e7a/942a7adc428f18b4842763c5bdbd3d6497c7.pdf> Consultado el 28.12.2018.

Oliveira, Camila; Fidalgo, Natalia y Sánchez, Ticiane. (2014). Thermoplastic starch: the preparation method. Metallurgical and Materials Department of Politechnic School. University of Sao Paulo Brazil.

Department de Genie Mecanique, Ecole de Technologie Superieure, Montreal Canadá. Pp. 4. Disponible en línea: <http://www.unc.br/artigoscientificos/art-cient-0032.pdf> Consultado 03.11.2018.

Pramanik, Pragati; MINA, Usha. y Sharma, Nimisha. (2015). Bioplastic: Sustainable Green plastic Nueva Dheli, India. S.e. Pp. 3. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/313315235_Bioplastic_Sustainable_Green_Plastic Consultado 23.09.2018.

Quiñonez- García, Verónica Alma. (2015). "Obtención de un polímero biodegradable a partir de almidón de maíz" ITCA-FEPADE. El Salvador. 1ª ed ISBN: 978-99961-50-21-0 Pp. 52 <https://www.itca.edu.sv/wp-content/themes/elaniin-itca/docs/2015-Obtencion-de-un-polimero-biodegradable.pdf>

Quiroz, Francisco; Cadena Francisco; Sinche, Luis; Chango, Iván y Aldás, Miguel (2009). Estudio de la degradación en polímeros oxo-biodegradables. Departamento de Alimentos y Biotecnología (DECAB). Centro de Investigaciones Aplicadas a Polímeros (CIAP) Revista Politécnica, Vol. 30(1) Pp. 179–19 <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/5537/1/Francisco-Quiroz.pdf> Consultado 18.05.2020

Rosales, Abigail de los Ángeles. (2016). Obtención de biopolímero plástico a partir de almidón de malanga (*Colocasia esculenta*) por el método de polimerización por condensación en el laboratorio 110 de UNAN-Managua (Trabajo de grado). Para optar al título de Licenciado en Química Industrial. Disponible en: <http://repositorio.unan.edu.ni/2687/1/28212.pdf> Consultado el 05.11.2018.

Ruiloba Ivanova. Li, Meilyn Quintero Rosa y Correa Jhonny. (2018). Elaboración de bioplástico a partir de almidón de semillas de mango: Bioplastic production from mango seed starch. Universidad Tecnológica de Panamá. Vol. 4 Pp. 28 - 39 DOI: <https://doi.org/10.33412/rev-ric.v4.0.1815>

Sánchez- Gallo, Edwin Gastón. (2015). Estudio de Factibilidad de una empresa de elaboración de pellets a partir de plástico reciclado (Trabajo de grado). Universidad Politécnica de Ecuador. Pp. 82. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/10270/1/UPS-GT001304.pdf> Consultado el 23.09.2018

Song, J, H; Murphy, P., J; Narayan, R; Y Davies, H., B. (2009). Biodegradable and compostable alternative to plastic (en línea). Brunel University. Imperial College London. Michigan State of University. Phil. Trans. R. Soc. B (2009) 364, Pp. 2127–2139 <https://royalsocietypublishing.org/doi/pdf/10.1098/rstb.2008.0289> Consultado el 25.11.2018

Song, Jim; Kay, Martin y Coles, Richard. (2011). Bioplastics. Brunel University London Inglaterra. Chapter 11. Pp. 295-319 DOI: <https://doi.org/10.1002/9781444392180.ch11> https://www.researchgate.net/publication/229918338_Bioplastics

Symphony. (2018). Reporte especial: Tecnología del control de vida del plástico. Información D2W. 25 pp Recuperado de: https://www.google.com/search?tbm=pts&cei=ry8WX474B6W3ggfvhqrABg&q=d2w+plasticos+pdf&coq=d2w+plasticos+pdf&gs_l=psy-ab.3...7309.7309.0.8069.1.1.0.0.0.170.170.0j1.1.0....0...1c.1.64.psy-ab..0.0.0....0.htXsVFikMPw#

Vásquez, Analía. (2016). Análisis tecnológicos y prospectivos sectoriales: Petroquímica y plásticos. Argentina. S.e. Pp. 67. Consultado el día 31 de octubre de 2018. Disponible en <http://www.mincyt.gob.ar/adjuntos/archivos/000/047/0000047524.pdf> Consultado 31.10/2018

Wilde, Bruno. (2002). Compostable packaging: a potential or a threat for compost EU-DG Environment & JRC Workshop Biological Gent-Belgium. Pp. 27 <https://ec.europa.eu/environment/waste/compost/presentations/dewilde.pdf>

Save Please, wait... Backup Asistente Post-Inferencia Asistente párrafos Finish Inconsistencies were found in tagged information Do you still want to generate the XML file? El click derecho y el comando "ctrl + c" está deshabilitado por motivos de seguridad Are you sure you want to close this window? If you close it, changes won't be saved Choose style to generate your article's PDF Click on either picture for a preview To close preview click anywhere outside Riga Upsala If you need to make any changes in the future, we suggest you choose the same PDF style you first chose

POLÍMEROS

Los polímeros son moléculas lineales o ramificadas formada por la repetición indefinida de grupos funcionales (monómeros) unidos por polimerización clasificándose en termoplásticos, termoestables y elastómeros. Los termoestables son polímeros que sufren una transformación química al ser sometidos a calor y sus moléculas crean una red tridimensional los cuales no pueden moldearse una vez se han solidificado; los elastómeros son polímeros con una estructura con mayor espacio entre moléculas y con propiedades elásticas entre los que podemos mencionar el caucho, el hule, etc. Sin embargo, los polímeros termoplásticos si pueden moldearse más de una vez por lo que está propiedad les confiere el nombre de plásticos (Oliveira et al. 2014; Sánchez, 2015).

En efecto, los polímeros termoplásticos se caracterizan por tener una alta resistencia y baja densidad, permite el aislamiento térmico, eléctrico y una resistencia a los ácidos y álcalis. Así pues, se descubrió que el gas etileno polimerizaba a específicas condiciones de temperatura y presión generando un polímero que denominaron Polietileno (PE), posterior a ello se desarrolló del Polivinilo de Cloro (PVC) al remplazar un átomo de hidrogeno por uno de cloro, con ello y con el bajo costo que propicio el uso de combustibles fósiles se priorizó la producción de polímeros plásticos surgiendo el polipropileno (PP), el tereftalato de polietileno (PET), poliestireno (PS) entre otros (Sánchez, 2015; Vásquez, 2016).

En el mismo orden, en la industria petroquímica se obtienen los gránulos o “pellet” de plásticos diversos para luego ser utilizados en empresas de mezclado de distintos plásticos o con partículas. Estos pellets plásticos corresponden a la forma principal de las resinas que son producidas y comercializadas. Los pellets pueden llegar a ser de varias formas ovoides, esféricas o cilíndricas con tamaños de 1 a 5 mm generalmente blancas o transparentes en función de su composición química y propósito ulterior (Sanchez, 2015). Al fundirse y moldearse estas resinas en forma de pellets se pueden fabricar los artículos plásticos utilizados diariamente en el hogar o en actividades industriales, químicas etc.

Existen diferentes procesos de degradación que sufren los polímeros entre los que se pueden mencionar:

Foto degradación: Se producen cambios físicos y químicos en el polímero a partir de la exposición a la luz ultravioleta o luz visible. Todos los plásticos fósiles o de base biológica sufren fotodegradación y usualmente se puede evidenciar cuando los artículos plásticos se vuelven quebradizos. Durante la exposición a radiación UV, se degradan las capas exteriores del material penetrando hacia el interior conforme avanza el proceso degradativo (Quiroz et al 2009). **Degradación mecánica:** La degradación mecánica es causada por los esfuerzos físicos a los cuales se somete el material ya sea por tensión, ruptura, golpes etc.

Degradación térmica: Se presenta por elevadas temperaturas y sufren cambios químicos sin la contribución de ningún otro factor, únicamente, por la energía térmica. Este valor puede variar mucho y estará relacionado al tipo de polímero plástico por lo que pueden encontrarse plásticos que se degradan a bajas temperatura y otros que soportan altas temperaturas utilizadas en la industria por su resistencia.

Degradación química: Esta puede ser hidrolítica, la causa de la degradación es el contacto del material con un medio acuoso; la penetración del agua dentro de la matriz polimérica produce el hinchamiento, ruptura de los puentes de hidrógeno intermoleculares, hidratación de las moléculas y, finalmente, la hidrólisis de los enlaces inestables (Mollinedo, 2017).

Oxodegradación–oxobiodegradación: Proceso de descomposición que sufren los plásticos que se les incorporan aditivos pro-oxidantes, procesos de copolimerización con monómeros que contengan grupos carbonilos, incorporación de enlaces hidrolizables dentro de las cadenas, incorporación de insaturaciones y otras más; con el fin de actuar como factores iniciadores de una foto-oxidación en la que se origina la fragmentación del polímero para facilitar el ataque microbiano posterior (Quiroz, 2009)

BIOPOLÍMEROS

Los biopolímeros son macromoléculas formadas por unidades funcionales que han sido desarrollados por diferentes organismos de maneras directas o procesadas indirectamente. Los biopolímeros plásticos o bioplásticos son descritos como todos los plásticos que también son de base biológica o pueden ser biodegradables. Por lo cual existen polímeros plásticos que pudiesen ser biodegradables y compostables dependiendo de las propiedades químicas de sus componentes. Pueden elaborarse a través de carbohidratos (almidón, celulosa, azúcar de caña etc.), proteínas (gelatina, caseína, seda y lana), lípidos (aceites vegetales) y otros grupos funcionales para formar: Ácido poliláctico-PLA, poliésteres como los Polihidroxicanoatos-PHA almidones termoplásticos entre otros (Song et al. 2009; Song et al. 2011; Pramanik et al. 2015; Vásquez 2016; Offiong y Ayodele, 2016).

Como puede observarse los lineamientos en la normativa ASTM-D6866 como método analítico estandarizado para determinar el contenido de base biológica de muestras sólidas, líquidas y gaseosas, utilizando la datación por radiocarbono (Vásquez, 2016; Beta Analytic, 2018).

Esto se logra medir por el carbono resultante de los compuestos formados de biomasa y el carbono derivado de insumos de origen fósil como el petróleo, ya que la biomasa contiene una cantidad bien caracterizada de carbono 14 que es fácilmente diferenciada de los combustibles fósiles (Narayan, 2006 a , b citado Song et al. 2009).

Así mismo, la normativa ASTM 5339-98, es un método de evaluación que determina el grado de la tasa de biodegradación aeróbica de materiales plásticos exponiéndolos a un ambiente de compostaje en ambiente controlado de condiciones de laboratorio. Las sustancias evaluadas son expuestas a un inóculo obtenido de un compostaje de desechos municipales (ASTM, 2003).

En el mismo orden de ideas, las normativas europeas EN 13432 y EN 14045 establecen que el material plástico a evaluar debe estar en un medio de compostaje con residuos orgánicos por un mínimo de 3 meses o 12 semanas y con un máximo de 6 meses. Tiempo en el cual el material evaluado debe alcanzar un 90% de biodegradabilidad con un porcentaje menor al 10 % y menor a 4 mm² de los fragmentos de residuos resultantes de la masa original (Wilde, 2002; European bioplastic, 2015).

Por lo tanto, es importante reconocer que no todos los materiales de polímeros de base biológica son biodegradables y viceversa. Igualmente, es importante reconocer que los atributos como la biodegradabilidad de un polímero dado deben combinarse de manera efectiva con el manejo adecuado de los desechos para capturar el máximo beneficio ambiental. Para los productos duraderos en los que la biodegradabilidad no es un elemento requerido por razones de rendimiento, seguridad y vida útil del producto, se deben identificar métodos alternativos de eliminación de desechos a energía o reciclaje (Song et al 2009).

ALMIDÓN

La principal ventaja del almidón es que cada célula de la mayoría de plantas tienden a almacenarlo en estructuras denominadas amiloplastos y estos pueden ser más abundantes dependiendo de la especie de planta o cultivo por lo que se considera abundante y renovable, en comparación con los materiales poliméricos la desventaja es que tiene grupos hidroxilos que le permite ser soluble en agua por lo que se disuelve el compuesto en unidades básicas (Nafchi et al. 2013).

Cabe agregar, que el almidón es un polímero natural compuesto por carbono, hidrogeno y oxígeno en una proporción de 6:10:5 (C₆ H₁₀ O₅)_n (Vásquez 2016). Pertenece a la clase de los carbohidratos compuesto por unidades de anhidroglucosa ligadas por enlaces α-D glucosídicos que establecen una estructura de cadena lineal de amilosa y amilopectina (Offiong y Ayodele, 2016).

Así pues, se pueden establecer los siguientes porcentajes de almidón para diversos cultivos: maíz puede alcanzar hasta un 28%, centeno 27%, trigo 23-27%, tapioca o yuca 18-23%, papa 20% (FAO, 1997;

BeMiller et al. 2009 citado por Ruiloba et al. 2018). El almidón extraído de la papa puede presentar un 26,21% de amilosa y 73,79% de amilopectina, el cual podría cambiar según la variedad del cultivo (Meza et al. 2019)

Además, los enlaces glucosídicos se forman por conexiones carbono 1 de las moléculas con el carbono 4 de otra molécula de glucosa lo que permite formar una cadena interconectada. El almidón puede presentar formas ya sea elíptico, oval o poligonal lenticular y esto se encuentra relacionado por los tipos de almidón tipo A (cereales) tipo B (raíces) y tipo C (leguminosas) con una estructura molecular semicristalina. Su tamaño puede variar entre 1 micras hasta 100 micras estableciendo así que el almidón de papa posee un tamaño entre 15 a 100 micras, el de maíz 15 micras de 15 micras (Nafchi et al. 2013). Así pues, puede aprovecharse el almidón de diferentes materias primas como lo es el almidón de las semillas de mango para lo cual, es necesario aislar el almidón de otras sustancias sin interés por procesos de laboratorio (Ruiloba et al. 2018).

PLASTIFICANTES

El plastificante es una sustancia normalmente líquida y de viscosidad mayor a la del agua que se adiciona a la mezcla con el fin de mejorar la flexibilidad del material mediante la reducción de las fuerzas intermoleculares (Astioli et al. 1994 y Santos et al. 2005 citados por Enríquez et al. 2012). El almidón posee pobres propiedades mecánicas, reológicas, térmicas y es muy soluble en agua debido por fuerzas intermoleculares e intramoleculares mediante puentes de hidrogeno y grupos hidroxilo libres a reaccionar en los almidones nativos. Estas propiedades pueden ser mejoradas al agregar plastificantes tales como polivinil de alcohol, glicerol, ácidos carboxílicos, sorbitol, propilenglicol, etilenglicol, polietilenglicol, trietil citrato, triacetina formamidas, urea, acetamida, azúcar, polioaminoácidos, lípidos, sorbatos y fosfatos entre otros (Nafchi et al. 2013; Pramanik et al. 2015; Offiong y Ayodele, 2016).

Con relación a lo expuesto anteriormente, los plastificantes solubles en agua como el glicerol son efectivos como agentes suavizantes para los almidones, mejorando la flexibilidad de las películas resultantes. Cuanto más se incluye una sustancia plastificante en una matriz polimérica, la elongación y la deformación aumentan (Otey y Wethoff, 1979; Díaz et al. 2007 citado por Enríquez et al. 2012).

ALMIDONES TERMOPLÁSTICOS

El almidón sufre una desestructuración o modificación física del estado granular al someterlo al calor, para lo cual existe una temperatura crítica para interactuar con un plastificante: Esto posibilita que los grupos hidroxilos reaccionen generando puentes de hidrogeno lo que posibilita que las cadenas se muevan libremente de manera individual perdiendo la semicristalinidad de su estructura generando los almidones termoplásticos (Shogren et al. 1970 citado por Nafchi et al. 2013; Offiong y Ayodele, 2016).

Fue evidente entonces, que los almidones termoplásticos se estima que alcanza el 50% de los bioplásticos del mercado (Pramanik et al. 2015). Estudios han mostrado que el almidón puede ser modificado por esterificación, eterificación y oxidación antes de su ser moldeado para lograr un alto grado de sustitución de los grupos hidroxilos (Nafchi et al. 2013).

La glicerina es un plastificante prometedor utilizado en la formulación de almidones termoplásticos, es un alcohol con tres grupos hidroxilo que le permiten ser soluble en agua. Le proporciona al bioplástico un aspecto morfológico suave y uniforme. Reduce la resistencia a la tracción y mejora la capacidad elástica del bioplástico, si se añade en cantidades superiores al 25% (Gálvez, 2016).

Además, al aumentar la temperatura el almidón atraviesa por una transición vítrea característico de un material polimérico, la cual se refiere al cambio inducido por el calor sobre las características de un polímero, ocasionado la rigidez en las cadenas, entrecruzamiento de cadenas y presencia de cristales, así

como incremento de las secciones amorfas reflejándose en un estado más sólido, frágil y quebradizo del almidón termoplástico (Mollinedo, 2017). La incorporación de almidón en las películas de PVA (Polivinilo de alcohol) mejora significativamente la biodegradación y desintegración de las mismas (Devís, 2015) por lo que puede utilizarse en mezclas con otros polímeros para mejorar sus propiedades reológicas y permitir una mayor biodegradación de las resinas termoplásticas convencionales

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio fue enfocado como una investigación exploratoria probando diferentes formulaciones, con el fin de desarrollar un prototipo de película biodegradable de almidón termoplástico elaborado con almidón de yuca (*Manihot esculenta* Crantz) y papa (*Solanum tuberosum*). Estos fueron adquiridos por venta comercial grado alimentario procesados de cultivos de la región por lo que son considerados como

almidones nativos; es decir, sin alteración molecular significativa y distribuidos como aditivos alimentarios con sistema certificado HACCP UL Management Systems Solutions. Así también, se utilizó agua destilada, glicerol y ácido acético glacial grado químico adquirido por droguería y laboratorios FALMAR S. A. de C. V. en presentación de 1 gal, 1 kg y 1 l respectivamente. La investigación fue llevada a cabo en mayo de 2018 hasta agosto de 2018 en el Centro de Investigación Ambiental de la Universidad de El Salvador en las siguientes coordenadas 13°38'09"N y 88°47'12" O, como parte de una iniciativa de innovación en el sector agroindustrial de la región.

La tabla 1 muestra las diferentes formulaciones basadas en investigaciones previas realizadas en otras regiones, así como por método de prueba y error, con el fin de realizar un acercamiento exploratorio del material y establecer el comportamiento de cada materia prima en el proceso de elaboración de almidones termoplásticos.

LA TABLA 1

Formulaciones para elaborar almidones termoplásticos propuestos para ambas materias primas.

Formulaciones	ÁA 3%	G	Ad	Al
F1	5 ml	3 ml (3.78g)	30 ml	10 g
F2	5 ml	5 ml (6.3 g)	60 ml	10 g
F3	20 ml	20 ml (25.2 g)	240 ml	40 g
F4	10 ml	10 ml (12.6 g)	80 ml	20 g
F5	15 ml	10 ml (12.6 g)	240 ml	30 g
F6	15 ml	9 ml (11.34 g)	150 ml	30 g
F7	10 ml	6 ml (7.56 g)	120 ml	20 g
F8	10 ml	5 ml (6.3 g)	97 ml	20 g

Fuente: Elaboración propia.

AA: ácido acético glacial; Al: Almidón de yuca y papa. G: Glicerol o glicerina, utilizado como agente plastificante; Ad: Agua destilada, utilizado como agente plastificante;

Para estandarizar el proceso de pesado de cada una de las formulaciones de los prototipos de biopelículas de almidones termoplásticos se utilizó equipo de pesaje Shimadzu balanza serie BL620S con un capacidad

máxima y mínima de lectura de 60 g y 0.01 g con un error de pesaje de 0.01 g. El almidón de yuca (*Manihot esculenta Crantz*) obtenido es diferente en apariencia que el almidón de papa (*Solanum tuberosum*) como puede consultarse en la figura 1 y figura 2. Se procedió a pesar las cantidades de almidón y fue sometido a 100 ml de agua con 3% de ácido acético romper las cadenas de amilosa y amilopectina de los gránulos de almidón y alterar la estructura semicristalina para poder ser moldeable como puede evidenciarse en la figura 3.



FIGURA 1

Almidón de yuca (*Manihot esculenta Crantz*) nativo o sin tratamiento previo alguno.



FIGURA 2

Almidón de papa (*Solanum tuberosum*) nativo o sin tratamiento previo alguno.



FIGURA 3

Almidón disuelto en 100 ml de solución de ácido acético glacial al 3 % y agua destilada.

Posterior a ello se procedió al homogenizado de la mezcla de almidón y ácido acético con el glicerol y el agua restante utilizando agitadores hasta lograr que la mezcla sea uniforme. Se procedió a calentar la mezcla y registrar 60 °C hasta alcanzar el punto de gelatinización de la mezcla para cada una de las formulaciones como puede notarse en la figura 4. Las mediciones fueron realizadas con un termómetro infrarrojo W89724 que posee un rango de temperatura de -50 a 750 ° C, con un rayo de 630 a 650 nm y un error de medición de +2.7°F o +1.5°C.

Como paso siguiente, se moldeó la mezcla de almidón termoplástico en bandejas de acero inoxidable con un área de 910 cm², con el fin de generar la forma de película lo más delgada posible. Posterior a ello se dejó secar por 3 días a temperatura ambiente entre 26 a 32 °C, seguido de una estabilización por 15 días para asegurar que el material no se retrograde o exista migración hacia el ambiente de los plastificantes de la mezcla.



FIGURA 4

Mezcla gelatinizada de almidón termoplástico lista para moldearse en película.



FIGURA 5

Biopelícula de almidón termoplástico--.



FIGURA 6:
Biopelícula de almidón termoplástico de yuca (*Manihot esculenta* Crantz).

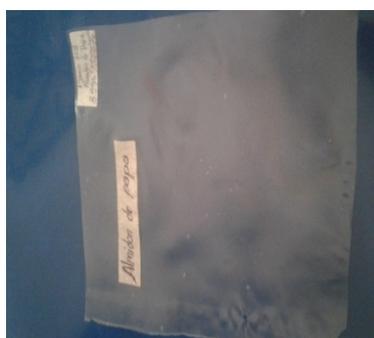


FIGURA 7:
Biopelícula de almidón termoplástico de papa (*Solanum tuberosum*).



FIGURA 8:
Elaboración de sachetz como alternativas al empaçado alimentario elaborados a partir de almidones termoplásticos.

El las figuras 5, 6 y 7 se puede apreciar las biopelículas de almidón termoplástico obtenidas al finalizar el proceso y como parte de los posibles usos como alternativa al empaçado alimentario y agropecuario se procedió a elaborar sachetz o sobrecitos de almidones termoplásticos conteniendo sal o azúcar como se muestra en la figura 8, lo que podría disminuir el uso de plásticos de un solo uso que generan la problemática ambiental y de salud humana presente a día de hoy.

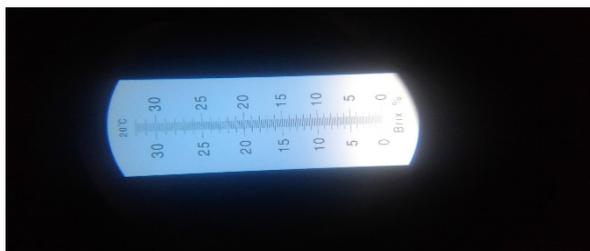


FIGURA 9:
Lectura de grados Brix de la mezcla gelatinizada de almidón termoplástico.

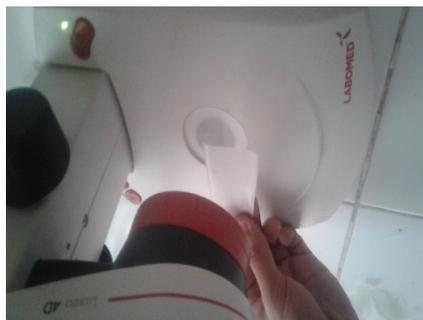


FIGURA 10
Observación de las biopelículas de almidón de yuca (*Manihot esculenta* Crantz).



FIGURA 11
Observación de las biopelículas de almidón de papa (*Solanum tuberosum*).

Cabe agregar que, fue utilizado un refractómetro ATC 0 a 32 °Brix con una precisión de 0.20 % con el fin de inferir el contenido de sólidos de cada una de las mezclas por refractometría como puede se puede evidenciar en la figura 9. Como siguiente paso se procedió a estudiar las biopelículas en el microscopio estereoscópico Luxeo 4d Labomed tal como se muestra en las figuras 10 y 11.

A continuación, se expone el diagrama de flujo en la figura 12, el cual fue diseñado para detallar en profundidad cada etapa, en el proceso de elaboración de biopelículas de almidón termoplástico de manera estandarizada; adaptando cada una de las formulaciones para ambos tipos de materia prima de interés propuestos.

Con base a lo establecido por la normativa EN 13432, se sometieron los prototipos de biopelícula de almidón termoplástico a un medio de compostaje por un mínimo y máximo de 3 a 6 meses, como método para evaluar la biodegradación en condiciones aeróbicas con temperatura ambiente entre 26 a 32°C; tal como se muestra en la figura 13, 14 y 15 para cada una de los almidones termoplásticos obtenidos ya sean flexibles o rígidos. Dicho medio se encuentra formado de desechos sólidos orgánicos junto con aserrín de madera descompuesto, tierra y alto contenido de organismos degradadores con un período de 5 a 6 meses de madurez con un 80 a 90% de humedad relativa.

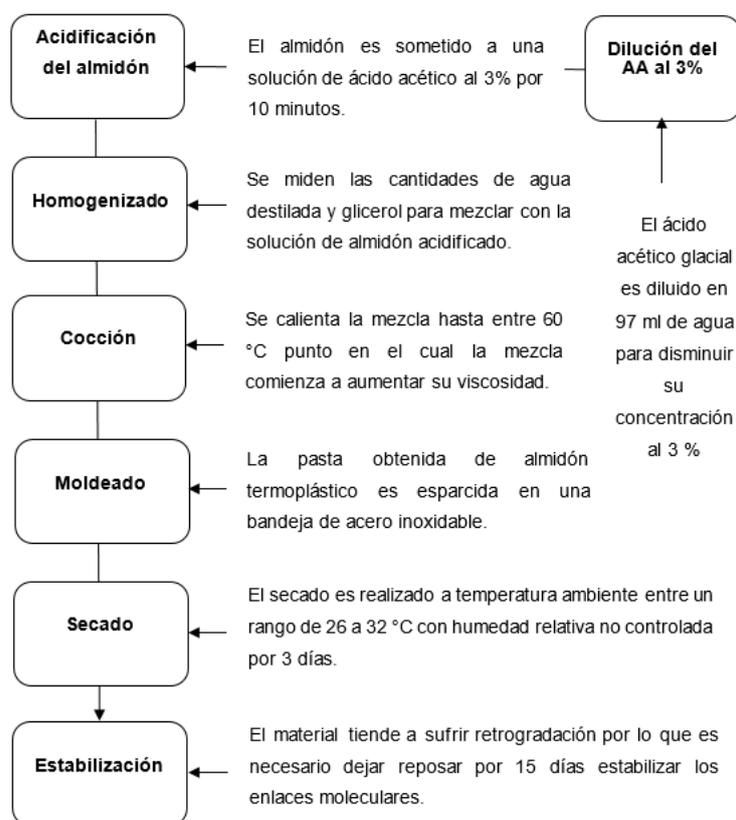


FIGURA 12
Diagrama de flujo para la elaboración de almidones termoplásticos
(Elaboración propia)



FIGURA 13:
Comparación de biodegradación de almidón termoplástico
sometido a medio de compostaje junto con plástico convencional.



FIGURA 14

Muestra de almidón termoplástico de papa (*Solanum tuberosum*) rígido obtenido por el bajo contenido de glicerol sometido a medio de compostaje.



FIGURA 15:

muestra de prototipo de almidón termoplástico de yuca sometido a medio de compostaje.

El medio posee un área de un 1 m de ancho, 1 m largo y 0.5 m de profundidad, obteniendo un aproximado de 0.5 m³ de materia orgánica en descomposición, la cual era periódicamente monitoreada con intervalos de 1 día para cada control y tomar datos de la alteración de las biopelículas de almidones termoplásticos.

DISCUSIÓN

Los prototipos elaborados con mayores cantidades de plastificante tienden a ser más flexible y por contraparte al disminuir la concentración de este en la formulación la biopelícula se vuelve más rígida tal como establece

Enríquez et al. (2012), presentando valores entre 4 a 21 °Brix que se encuentran relacionados a esta propiedad del material.

En cuanto a la biopelícula, esta puede presentar una coloración blanquecina semitransparente y o café ligeramente, coincidiendo con lo publicado por Cuervo y Mosquera (2011) quienes consideran que, a mayor contenido de glicerol aumenta la transparencia de las películas, debido a que tiene mayor capacidad de retener agua en su estructura lo que facilita el paso de la luz.

Respecto a los métodos de moldeo, estos influyeron en la uniformidad de la matriz elaborada y la textura por lo que se presentó una cara de la biopelícula lisa y otra áspera, así mismo en el proceso de secado y estabilización el prototipo puede deformarse por las variaciones de temperatura y la humedad relativa evidenciada en la figura 16. La biopelícula sufre una retrogradación tal como menciona Nafchi et al. (2013) debido a que los plastificantes no logran incorporarse a la cadena de amilosa y amilopectina migrando hacia el ambiente desde la matriz, generando una sensación grasosa característica del glicerol agravándose en ambientes húmedos.

Al respecto, de las altas temperaturas en el proceso de gelatinización del almidón termoplástico, estas pueden generar burbujas ocasionando que la biopelícula no sea uniforme como se logra evidenciar en la figura 17. Además, estas biopelículas de almidón presentan una estructura semicristalina que podría indicar que los gránulos de almidón no lograron enlazarse con el plastificante, generando su recristalización tal como se muestra en la figura 18 y 19.



FIGURA 16

Deformación de los almidones termoplásticos obtenidos.



FIGURA 17

Presencia de aberturas en las biopelículas por la generación de burbujas durante el proceso de cocción.



IGURA 18
Estructura recrystalizada de las biopelículas de almidones termoplásticos vista por el microscopio estereoscopio.

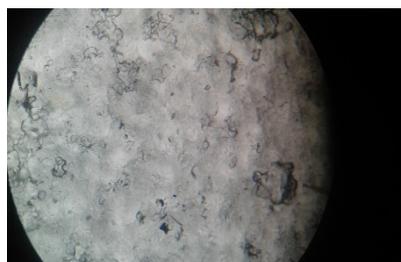


FIGURA 19
Estructura desordenada originada por la retrogradación del material vista en el microscopio estereoscopio.

Con respecto, a los prototipos sometidos a un ambiente de compostaje desde el 22 de julio de 2018 hasta al 30 de julio de 2018, se evidenció que fueron atacados por microorganismos que propician la descomposición, hasta alcanzar 3 semanas a 1 mes.

Como se puede notar en la figura 20 el material es altamente soluble y en la figura 21 se evidenciaron microorganismos tales como ácaros descomponedores de materia orgánica, posterior a ese tiempo el material se biodegrada, hasta el punto en el que no es posible ser reconocido con el material compostado similar a lo determinado por Meza et al. (2019) al utilizar la metodología ISO 17556-AENOR 2013, para la evaluación de biodegradabilidad sometiendo bioplástico, celulosa y polietileno de baja densidad a un medio de compostaje por 3 meses con 6 meses de degradación previo, registrando una biodegradabilidad de 64,21%, 63.51% y 6.95% respectivamente. Sin embargo, el material puede seguir biodegradarse hasta lograr incorporarse al ecosistema, así mismo los resultados se encuentran acorde a la normativa europea EN 13432 y a lo expuesto por Devís (2015). Por lo que se establece un período de 1 a 2 meses para la biodegradación en ambientes con altos contenidos en materia orgánica y humedad, así como 3 a 6 meses en ambientes con poca materia orgánica y baja humedad.



FIGURA 20

Prototipos atacados por microorganismos y descompuestos por la acción enzimática de estos y por el alto contenido de humedad.



FIGURA 21

Presencia de ácaros encontrados en los prototipos en biodegradación.

En efecto, el almidón termoplástico no es posible sellarlo con selladoras de impulso, porque las cadenas de amilosa y amilopectina se desnaturalizan sin llegar a fundirse ambas capas. Para estimar el costo de elaboración de los almidones termoplásticos, se elaboró la tabla 2 que muestra la inversión en cada una de las materias prima.

TABLA 2
Costo de inversión en materias primas para la elaboración de almidones termoplásticos

Materia Prima	Costo con el uso mínimo de materias primas.	Área	Grosor	Costo con el uso máximo de materias primas
Glicerina			0.5 a 2 ml	
Ácido acético				
Agua				
Almidón				
Total	\$0.097 dólares americanos.			\$0.4975 dólares americanos

Elaboración propia

descomposición exhibida en los prototipos de almidón termoplástico y la presencia de microorganismos degradadores tales como ácaros, comprueban que el almidón es un material biodegradable y por su abundancia es considerado una materia prima renovable. Por lo cual es necesario profundizar con cultivos ricos en almidón como: la malanga (*Colocassia esculenta*), el otoo (*Xanthosoma violaceum y hoffmanii*), el ñame (*Dioscorea alata, capillaris, composita, esurientiu, macrostachya, salvadorensis, tuerckheimii*) y el camote o papa dulce (*Ipomoea batata*), como materias primas disponibles con alto potencial para ser una alternativa sin generar competencia al sistema alimentario, para ser utilizadas en la elaboración de empaçado alimentario de un solo uso o insumos agropecuarios

Es necesario utilizar otros tipos de acidificantes y variar el tiempo de estos con el almidón para romper las cadenas de amilosa y amilopectina, así como utilizar diferentes tipos de plastificantes con el fin de disminuir la hidrofiliidad del material, para estabilizar la estructura molecular del almidón con el fin de evitar su recristalización.

Los bioplásticos son más caros en comparación con los plásticos petroquímicos convencionales respaldado por amplia literatura en el tema. Sin embargo, este valor es compensado por la menor cantidad de gases de efecto invernadero aprovechando el CO₂ proveniente de la biomasa, lo que permite restablecer un equilibrio basado en economía circular; así también, por las diferentes alternativas de reciclado o disposición de los residuos, ya sea por procedimientos aeróbicos o anaeróbicos.

LITERATURA CITADA

- Arévalo-Alvarenga, Verónica Lisette; Azucena-Peña, Gerson Arnoldo, y Amaya-Laínez, Sandra Elisa. (2018). Formulación y caracterización de una biopelícula comestible elaborada a partir de almidón de sorgo (*Sorghum bicolor* (L) Moench) y Yuca (*Manihot esculenta*) (Tesis). Para optar al título de Ingeniero en Alimentos. Universidad de El Salvador. Pp. 304. <http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/15440>
- ASTM 5338-98. (2003). Designation: D 5338 – 98 (Reapproved 2003) Standard Test Method for Determining Aerobic Biodegradation of Plastic Materials Under Controlled Composting Conditions. United States Pp. 6. <https://allcivilstandard.com/wp-content/uploads/2018/12/D-5338.pdf>
- Beta analytic. (2004). ASTM D6866-18 Analizar el contenido de base biológica. Estados Unidos. S.ed. S. Trad. <https://www.betalabservices.com/espanol/base-biologica/astm-d6866.html> Consultado el 23.09.2018

- Calderon, Stanley Paul. (1900) Repositorio digital de ciencia y cultura de El Salvador. 1a ed Biblioteca Nacional de El Salvador Francisco Gavidia. Pp. 277. <http://www.redicces.org.sv/jspui/bitstream/10972/1558/1/Lista%20Preliminar%20de%20las%20Plantas.pdf> Consultado 02.04.2020.
- Castillo, Ruth; Escobar, Eliasury; Fernández, Dianeth; Gutiérrez, Ramón; Morcillo, Jonathan; Núñez, Neryana. y Peñazola, Sandra. (2015). Bioplástico a base de la cascara de plátano. *Journal of Undergraduate Research. Revista de Iniciación Científica. Universidad Tecnológica de Panamá* Pp. 4. <http://revistas.utp.ac.pa/index.php/ric/article/download/346/339> Consultado el 04.11.2018.
- Cuervo-Pardo, Oscar Hernando y Mosquera-Velasco, Reinaldo. (2011). Propiedades fisicoquímicas y mecánicas de películas obtenidas a partir de almidón nativo y oxidado de arracacha *Physicochemical and mechanical properties of film obtained from native and oxidized arracacha starch. Revista ION, ISSN: 0120-100X Colombia.* Pp 8. <https://www.redalyc.org/pdf/3420/342030285004.pdf>
- Devís Peinado, M. (2015). Estudio de la biodegradabilidad y desintegración de películas a base de almidón y PVA que incorporan diferentes sustancias antimicrobianas. *Universitat Politècnica de Valencia- España.* Pp. 59. <http://hdl.handle.net/10251/56383>
- Enríquez, Mario; Velasco, Reinaldo. y Ortiz, Vicente. (2012). Composición y procesamiento de películas biodegradables basadas en almidón. *Universidad del Cauca. Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial. Vol 10 No. 1 (182 - 192)* <http://www.scielo.org.co/pdf/bsaa/v10n1/v10n1a21.pdf>
- European bioplástico. (2015). EN 13432 certified bioplastics performance in industrial composition. Pp. 5. Berlín https://docs.european-bioplastics.org/publications/bp/EUBP_BP_En_13432.pdf Consultado el 05.04.2020
- Gálvez- Arévalo, Ana Gabriela. (2016). Elaboración de plástico biodegradable a partir de almidón extraído del Maíz (*Zea mays*) (Trabajo de grado). Para optar al título de Ingeniera Química. Universidad San Carlos de Guatemala. Pp. 90. <http://www.repositorio.usac.edu.gt/5102/1/Ana%20Gabriela%20G%C3%A1lvez%20Ar%C3%A9valo.pdf>
- Greene, Joseph. (2015). Degradation of biodegradable, UV-degradable and oxodegradable plastics in MSW in vessel Composting Environment. *California State University, California, USA 95929-0789* Pp. 5. https://www.researchgate.net/publication/225587239_Biodegradation_of_Compostable_Plastics_in_Green_Yard-Waste_Compost_Environment
- Hernández-Vásquez, Saturnnin. (1997) Inventario de recursos Fito genéticos nativos no tradicionales con importancia alimenticia en El Salvador. Repositorio institucional de la Universidad de El Salvador.
- Ibarra, L. (2018). La industria plástica se transforma en El Salvador (página web). *El Economista.* Recuperado de: <https://www.economista.net/economia/La-industria-plastica-se-transforma-en-El-Salvador-20181123-0019.html>
- Meza, Paola; Quipuzco, Lawrence y Meza, Victor. (2019). Elaboración de bioplásticos y determinación de su biodegradabilidad - Proyecto de laboratorio. *Rev. del Instituto de Investigación FIGMMG -UNMSM Vol. 22 (43).* Pp: 67 - 80 ISSN-L: 1561 - 0888 <https://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/iigeo/article/view/16691/14254>
- Ministerio del Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN). (2017). Informe nacional del estado del medio ambiente, INEMA 2017. San Salvador, El Salvador. Centroamérica.
- Mollinedo-Paíz, Edgar Leonel. (2017). Plástico biodegradable a partir de almidón de maíz; evaluando su degradabilidad con ácido sulfúrico y su expansión polimérica al variar la formulación (Trabajo de grado). Para optar al título de Licenciado en Química. Universidad San Carlos de Guatemala. Pp. 109. Pp. 109. Disponible en: <http://www.repositorio.usac.edu.gt/8059/1/Edgar%20Leonel%20Mollinedo%20Paiz.pdf> Consultado 04.11.2018.
- Nafchi, Abdorreza Mohammadi; Moradpour, Mahdiyeh; SAEIDI, Maliheh. y Alias Abd Karim. (2013). Thermoplastic starches: Properties, challenges and prospects. *Islamic Azad University. Iran. Food Biopolymer Research Group, University Sains Malaysia.* Pp. 12. https://is.muni.cz/el/1431/podzim2013/C3804/Thermoplastic_starches__Properties__challenges__A_Review.pdf Consultado el 28.10.2018.

- Offiong, Etom Udeme; y Ayodele, Sannin Lateef. (2016). Preparation and characterization of thermoplastic starch from sweet potato. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, Vol. 7. India. Pp. 6. Corpus ID: 212557163 <https://pdfs.semanticscholar.org/2e7a/942a7adc428f18b4842763c5bdbd3d6497c7.pdf> Consultado el 28.12.2018.
- Oliveira, Camila; Fidalgo, Natalia y Sánchez, Ticiane. (2014). Thermoplastic starch: the preparation method. Metallurgical and Materials Department of Politechnic School. University of Sao Paulo Brazil.
- Pramanik, Pragati; MINA, Usha. y Sharma, Nimisha. (2015). Bioplastic: Sustainable Green plastic Nueva Dheli, India. S.e. Pp. 3. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/313315235_Bioplastic_Sustainable_Green_Plastic Consultado 23.09.2018.
- Quiñonez- García, Verónica Alma. (2015). "Obtención de un polímero biodegradable a partir de almidón de maíz" ITCA-FEPADE. El Salvador. 1ª ed ISBN: 978-99961-50-21-0 Pp. 52 <https://www.itca.edu.sv/wp-content/themes/elaniin-itca/docs/2015-Obtencion-de-un-polimero-biodegradable.pdf>
- Quiroz, Francisco; Cadena Francisco; Sinche, Luis; Chango, Iván y Aldás, Miguel (2009). Estudio de la degradación en polímeros oxo-biodegradables. Departamento de Alimentos y Biotecnología (DECAB). Centro de Investigaciones Aplicadas a Polímeros (CIAP) *Revista Politécnica*, Vol. 30(1) Pp. 179–19 <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/5537/1/Francisco-Quiroz.pdf> Consultado 18.05.2020
- Rosales, Abigail de los Ángeles. (2016). Obtención de biopolímero plástico a partir de almidón de malanga (*Colocasia esculenta*) por el método de polimerización por condensación en el laboratorio 110 de UNAN-Managua (Trabajo de grado). Para optar al título de Licenciado en Química Industrial. Disponible en: <http://repositorio.unan.edu.ni/2687/1/28212.pdf> Consultado el 05.11.2018.
- Ruiloba Ivanova. Li, Meilyn Quintero Rosa y Correa Jhonny. (2018). Elaboración de bioplástico a partir de almidón de semillas de mango: Bioplastic production from mango seed starch. Universidad Tecnológica de Panamá. Vol. 4 Pp. 28 - 39 DOI: <https://doi.org/10.33412/rev-ric.v4.0.1815>
- Sánchez- Gallo, Edwin Gastón. (2015). Estudio de Factibilidad de una empresa de elaboración de pellets a partir de plástico reciclado (Trabajo de grado). Universidad Politécnica de Ecuador. Pp. 82. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/10270/1/UPS-GT001304.pdf> Consultado el 23.09.2018
- Song, J, H; Murphy, P., J; Narayan, R; Y Davies, H., B. (2009). Biodegradable and compostable alternative to plastic (en línea). Brunel University. Imperial College London. Michigan State of University. *Phil. Trans. R. Soc. B* (2009) 364, Pp. 2127–2139 <https://royalsocietypublishing.org/doi/pdf/10.1098/rstb.2008.0289> Consultado el 25.11.2018
- Song, Jim; Kay, Martin y Coles, Richard. (2011). Bioplastics. Brunel University London Inglaterra. Chapter 11. Pp. 295-319 DOI: <https://doi.org/10.1002/9781444392180.ch11> https://www.researchgate.net/publication/229918338_Bioplastics
- Symphony. (2018). Reporte especial: Tecnología del control de vida del plástico. Información D2W. 25 pp Recuperado de: https://www.google.com/search?tbm=pts&ei=ry8WX474B6W3ggfvhqrABg&q=d2w+plasticos+pdf&oq=d2w+plasticos+pdf&gs_l=psy-ab.3...7309.7309.0.8069.1.1.0.0.0.170.170.0j1.1.0...0...1c.1.64.psy-ab..0.0.0...0.htXsVFikMPw#
- Vásquez, Analía. (2016). Análisis tecnológicos y prospectivos sectoriales: Petroquímica y plásticos. Argentina. S.e. Pp. 67. Consultado el día 31 de octubre de 2018. Disponible en <http://www.mincyt.gob.ar/adjuntos/archivos/000/047/0000047524.pdf> Consultado 31.10/2018
- Wilde, Bruno. (2002). Compostable packaging: a potential or a threat for compost EU-DG Environment & JRC Workshop Biological Gent-Belgium. Pp. 27 <https://ec.europa.eu/environment/waste/compost/presentations/dewilde.pdf>