



Obtención de bioplásticos a partir de desechos agrícolas. Una revisión de las potencialidades en Ecuador

María Antonieta Riera^{1*} y Ricardo R. Palma²

¹⁾ Facultad de Ciencias Matemáticas, Físicas y Químicas. Universidad Técnica de Manabí. Ecuador

²⁾ Facultad de Ingeniería Industrial. Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza, Argentina

(*) mriera@utm.edu.ec

Recibido: 12/09/2018

Revisado: 26/09/2018

Aceptado: 22/11/2018

<https://doi.org/10.53766/AVANQUIM/2018.13.03.04>

Resumen

Luego de un repaso del estado del arte de los artículos recientes más destacados, se analizan las posibles alternativas que los polímeros biodegradables aportarían al problema ambiental generado por sus parientes sintéticos. Se parte de estudios donde se han obtenido bioplásticos de almidón, pudiendo ser una experiencia replicable. Se finaliza con una discusión sobre los métodos de toma de decisión con los que es posible seleccionar el desecho agrícola más adecuado para obtener bioplásticos. Este estudio sirve de partida para generar un debate posterior que pueda beneficiar a los sistemas productivos locales y el ámbito académico que lo sostiene.

Palabras claves: bioplásticos; desechos agrícolas; análisis multicriterios; toma de decisión

Abstract

Obtaining bioplastics from agricultural waste: A review of the Ecuador's potentialities. After a review of the state of the art of the most prominent articles, the possible alternatives that biodegradable polymers contribute to the environmental problem generated by their synthetic relatives are analyzed. It is based on studies where bioplastics have been made with thermoplastic starch, which can be a replicable experience. It ends with a discussion on the methods of decision making with which the most suitable agricultural waste can be selected to obtain bioplastics. This study can be used to
Keywords: Bioplastics; Agricultural waste; Multicriteria analysis; decision making

Introducción

La modernización de los procesos ha buscado desde sus inicios la satisfacción de las necesidades del ser humano, muchas veces orientándose a la fabricación de productos de corta vida útil sin considerar el costo ambiental que este supone. Uno de ellos lo representa la producción de plástico que ha ido en aumento a medida que transcurren los años y con ello la cantidad de desechos que se generan.

Aunque los plásticos pueden ser de origen biológico, los más utilizados son los sintéticos o semi-sintéticos provenientes del petróleo y que se obtienen por polimerización a través de la unión de varias moléculas llamadas monómeros que al unirse entre sí, constituyen largas cadenas o polímeros.

El plástico se caracteriza por ser un material ligero, resistente, flexible, de fácil fabricación y sobre todo económico. Su aplicación es tan amplia que puede servir bien sea para fabricar hilo textil o para elaborar piezas de un avión.

La mitad de los plásticos que se consumen se fabrican en Asia, siendo China el principal productor con un 29%, seguido de Europa con 19%, países del USMCA (antiguamente

NAFTA) con 18% y ocupando casi el último lugar América Latina con 4%¹.

Para el año 2015 se registró una producción mundial de 407 millones de toneladas (Mt) de plástico, de los cuales casi la mitad (146 millones) se usan para obtener envases y embalajes. La vida útil de estos no supera los seis meses y después de su uso la mayor parte ni se reciclan ni se incineran². Afortunadamente la práctica de la incineración, sobre todo a bajas temperaturas está disminuyendo en el planeta motivada por las acciones de organismos multilaterales para evitar la contaminación ambiental y sobre todo la incorporación de dioxinas y furfural a la atmósfera.

Un grupo de científicos calculó en el 2017 que existía hasta la fecha unos 8300 Mt de plástico producido. De esa cantidad, más de 6300 Mt se habían convertido en residuos y de estos unos 5700 Mt no han pasado nunca por un contenedor de reciclaje. No se conoce cuanto de este plástico termina en el mar, aunque se sabe que llega junto con las corrientes de los ríos al ser arrastrados por estas. Tampoco está definido el tiempo que tarda ese plástico en biodegradarse por completo hasta el nivel molecular, pero se calcula que está entre 450 años o nunca³.

Esta situación es grave, no sólo por lo estético, sino por el daño que está causando a la fauna marina. Mucho de los plásticos en los océanos por acción del viento y del sol se convierten en micropartículas, facilitando su ingreso al estómago de algunas especies al confundirlas con alimento, lo cual en ocasiones puede causar la muerte. En otros casos, cuando el plástico es de mayor tamaño estos pueden quedar atrapados y sufrir mutilaciones o malformaciones³.

Como un mecanismo de gestión de desechos plásticos, algunos países del mundo han considerado exportarlos como material de reciclaje a China. Sin embargo a partir del 01 de marzo del 2018, China puso en marcha su ley de prohibición de importación donde se imponen prohibiciones para ocho tipos de residuos de plástico, incluidos los polímeros de polietileno, poliestireno, policloruro de vinilo, tereftalato de polietileno y otros (por ejemplo polipropileno), así como películas de plástico de aluminio y discos compactos⁴.

Esta realidad exige la creación de sociedades de consumo responsables orientadas a cambiar la filosofía de vida de usar y tirar, pero también comprometida con el diseño de nuevos productos que satisfagan las necesidades de los usuarios a la vez que se reduce el impacto ambiental.

Una alternativa propuesta es la utilización de almidones termoplásticos como materia prima que compita con los polímeros sintéticos⁵. Estudios recientes han reportado que es posible obtener bioplásticos a partir del fruto de la palma del melocotón⁶, de la cáscara de papa⁷, desechos de comida reciclada⁸, así como de proteína de canola para el procesamiento de empaques para alimentos⁹.

En pos de aportar al desarrollo de este tipo de materiales, algunas instituciones de importancia en el mundo de la ciencia se dedican a estudiar este tema. Tal es el caso del Instituto de Nuevos Materiales de la Universidad de Georgia, Atenas, donde están usando polímeros sintetizados por microbios para fabricar envases, los cuales se esperan que sean rápidamente compostables y biodegraden en el mar³.

El Centro de Sostenibilidad de Tecnologías Químicas (CSCT) de la Universidad de Bath, Reino Unido, ha desarrollado nuevos monómeros hechos de azúcares naturales y CO₂, para la síntesis de policarbonatos libres de bisfenol A (BPA). El plástico obtenido se caracteriza por ser renovable, transparente y resistente al calor, pudiendo degradarse nuevamente a dióxido de carbono y azúcares por la acción de las enzimas, convirtiéndolo en una alternativa sostenible para ser usado como materiales de alto rendimiento con aplicaciones biomédicas¹⁰. En la actualidad científicos e ingenieros del CSCT en colaboración con la industria, siguen desarrollando procesos para la incorporación de CO₂ en una nueva generación de plásticos renovables y sostenibles¹¹.

Algunos investigadores de la Universidad de Otago, Nueva Zelanda, están desarrollando una envoltura flexible para ali-

mentos, utilizando subproductos del maíz y de los mariscos. Se trata de un bioplástico comestible con principios activos, que busca ofrecer una alternativa a los plásticos petroquímicos existentes al ser fácilmente compostable¹².

A nivel industrial la producción actual de bioplásticos representa aproximadamente el 1% de los casi 320 millones de toneladas de plástico que se producen por año. Se espera que la capacidad de producción mundial de bioplásticos pase de 2,05 millones de toneladas en 2017 a aproximadamente 2,44 millones de toneladas en 2022. Para el 2017 Asia registró un 56% de la producción de bioplástico, Europa un 18%, Norteamérica un 16% y por último Suramérica 10%¹³.

En América del Sur la producción de bioplástico está dada por Colombia, Chile, Argentina y Brasil. Específicamente en el Ecuador no existe hasta la fecha registro de empresas que se dediquen a la producción de bioplásticos, aunque si se reportan investigaciones orientadas a su obtención a partir de almidón de achira¹⁴, banana¹⁵, oca¹⁶, encontrándose dentro de las especies cosechadas en el país.

El Ecuador es un país con gran actividad agrícola, en este sentido es de interés estudiar el aprovechamiento de desechos agrícolas como materia prima para la obtención de bioplásticos, siendo así una oportunidad de negocio para el país, a la vez que se contribuye con el desarrollo de nuevos materiales amigables con el ambiente.

Emprender un proyecto de este tipo requiere evaluar las características de las materias primas disponibles, a fin de decidir cuál de ellas representa la alternativa más sostenible para la obtención de un producto que satisfaga las necesidades del mercado, brinde rentabilidad y no comprometa las generaciones futuras.

Esta evaluación puede realizarse empleando herramientas de análisis multicriterios para la toma de decisiones (MCDA), las cuales consisten en un conjunto de metodologías basadas en el uso de software y aplicación de diferentes procedimientos de ponderación y agregación, para la evaluación sistemática de distintas alternativas ante situaciones complejas donde se espera seleccionar la mejor opción¹⁷.

El uso de un método de análisis MCDA facilitaría la evaluación de los distintos desechos agrícolas generados en el país según sus características físico-químicas, para seleccionar el más adecuado como materia prima en un proceso de producción de bioplástico.

Este trabajo busca sugerir la aplicación de un método de análisis multicriterios dentro de los existentes, para seleccionar el desecho agrícola más adecuado en la producción de bioplásticos del Ecuador, previa revisión de los registrados en el espacio geográfico en el cual este se focaliza. El mismo serviría como punto de referencia al plantear la posibilidad de utilizar una metodología con rigor científico que apoye desde el punto de vista técnico y económico, la elección de un material

desarrollado experimentalmente para ser usado a nivel industrial en la fabricación de un plástico biodegradable.

Aspectos generales de los plásticos

Los polímeros pueden ser naturales, sintéticos o semisintéticos. Los naturales incluyen proteínas, enzimas y polisacáridos¹⁸. Los plásticos sintéticos se clasifican como termoplásticos o termoestables según las características que estos poseen. Los termoplásticos pueden calentarse y enfriarse repetidas veces para darles la forma deseada, mientras que los termoestables, una vez que toman su forma, es imposible fundirlos para moldearlos nuevamente¹.

Desde el punto de vista de biodegradabilidad, los plásticos pueden ser o no biodegradables. Los biodegradables a diferencia de los que no lo son, se caracterizan por degradarse completamente en CO₂ y H₂O por la acción de algunos microorganismos. En ambos casos se pueden obtener a partir de recursos naturales o de origen fósil. Entre los biodegradables provenientes de recursos naturales están el ácido poliláctico (PLA), polihidroxialcanoatos (PHA), polisacáridos derivados, poliaminoácidos y entre los derivados del petróleo se mencionan el poli (ϵ -caprolactona) (PCL), poli (succinato / adipato de butileno) (PBS/A) y poli (adipato-tereftalato de butileno) (PBA/T). Dentro de los no biodegradables de origen fósil se encuentran el polietileno (PE), polipropileno (PP), poliestireno (PS) y el tereftalato de polietileno (PET) y existen algunos que aunque poseen un 30% de recursos renovables en su composición no son biodegradables¹⁹.

Pese a la gran variedad de plásticos existentes en la actualidad, los más usados como material de envase y embalaje, los cuales representan el mayor volumen de producción de plástico en el mundo, son el PET, el PE de alta (HDPE) y baja densidad (LDPE), policloruro de vinilo (PVC), PP, y PS²⁰. Por otra parte, en cuanto a la producción mundial de resinas y fibras aumentó de 2 Mt en 1950 a 380 Mt en 2015, representando una tasa de crecimiento anual del 8,4%²¹.

Se estima que en la actualidad se usan 2500 Mt de plásticos, o el 30% de todos los plásticos que se hayan producido alguna vez. Entre 1950 y 2015, la generación acumulativa de desechos plásticos primarios y secundarios (reciclados) ascendió a 6300 Mt. De estos, casi 800 Mt (12%) han sido incinerados y 600 Mt (9%) se han reciclados y de estos últimos solo el 10% se han reciclado más de una vez. Cerca de 4900 Mt de todos los plásticos producidos alguna vez, se descartaron y se acumulan en vertederos o en el entorno natural²¹.

Para reducir la contaminación causada por plásticos surgieron los polímeros biodegradables. La biodegradación de polímeros consiste en tres etapas. La primera es el biodeterioro, que es la modificación de las propiedades mecánicas, químicas y físicas del polímero por acción del crecimiento de microorganismos en o dentro de la superficie de los polímeros. La biofragmentación, que es la conversión de polímeros a oligóme-

ros y monómeros por acción de microorganismos y por último la asimilación, donde ocurre una integración de átomos a partir de fragmentos poliméricos dentro de las células microbianas, para aportar las fuentes de carbono, energía y nutrientes, necesarias para convertir el carbono del plástico en CO₂, agua y biomasa²².

Producción de bioplástico

Algunos bioplásticos se obtienen de polímeros de origen natural empleados para la producción de películas biodegradables están los hidratos de carbono como almidón, celulosa, alginatos; proteínas; lípidos como ceras y acetoglicéridos; además de polímeros sintéticos biodegradables entre los que se mencionan el PLA, PHA y polihidroxibutirano PHB²³.

Se ha demostrado que es factible obtener películas plásticas biodegradable flexibles a partir del almidón de yuca y pectina²⁴, olote de maíz²⁵, papa²⁶, plátano²⁷ y de otros polímeros naturales, como una alternativa para empaques de alimentos²⁸. Existen métodos establecidos para el procesamiento y elaboración de películas biodegradables basadas en almidón²⁹, e incluso patentes para procesos de producción de almidón termoplásticos (*thermoplastic starch*) como materia prima de películas biodegradables³⁰.

Pese a que algunos bioplásticos se obtienen a partir de cultivos como el arroz, maíz, trigo, caña de azúcar o remolacha azucarera y aunque la tierra cultivada hoy en día para tal fin es mínima, esto es motivo de preocupación por competir con las necesidades de alimentación. Las opciones de materias primas alternativas que aún continúan en investigación y desarrollo, son las denominadas materias primas celulósicas o de segunda generación e incluyen los subproductos agrícolas y flujos de desechos³¹.

Los subproductos agrícolas aunque en su mayoría deben tratarse químicamente para extraer o aislar macromoléculas específicas, como celulosa, lignina y suberina, o monómeros, contienen sustancias como lípidos, polisacáridos y compuestos aromáticos, útiles en la elaboración de bioplásticos³². Algunos usados en la obtención de films plásticos son la cáscara de papa, residuos de zanahoria, piel de tomate, orujo de manzana, cáscara de maní³³, paja de arroz³⁴, semillas de *jackfruit*³⁵.

En un estudio realizado se desarrolló una película bioplástica a partir de una combinación de dos biopolímeros: cáscara de plátano y almidón de maíz, con diferentes concentraciones. Las películas obtenidas fueron caracterizadas en cuanto a resistencia a la tracción, absorción de agua, análisis térmico y en general se concluyó que la combinación realizada es una alternativa en la producción de bioplásticos³⁶.

Otros flujos de desechos de los cuales se utiliza bien sea el almidón, la proteína, el colágeno, la queratina, la quitina o el quitosano presente en su composición, incluyen desechos de

carne y harina de hueso de mamíferos, gelatina de pieles y huesos de mamíferos, plumas de aves, piel de pollos, cáscaras de huevos, desechos del procesamiento del pescado, exoesqueleto de crustáceos³³.

Una combinación de diferentes fuentes de almidón (maíz, patata, tapioca) y varios plastificantes (glicerina, aceite de salvado de arroz, aceite de sésamo, aceite de castor, soja aceite y aceite de oliva), se han estudiado como una aplicación futura en la elaboración de películas comestibles para alimentos³⁷. También se ha propuesto el uso de fibras naturales provenientes de residuos de frutas³⁸⁻³⁹, textiles⁴⁰, quitosano⁴¹ o partículas de madera⁴²⁻⁴³ y en otros casos la adición de óxido de zinc⁴⁴, grafeno^{45,46,47}, tierra de diatomeas o bentonita⁴⁸, para reforzar este tipo de materiales y mejorar sus propiedades mecánicas, físicas o químicas.

Sartika *et. al.*⁴⁹ usaron celulosa microcristalina proveniente de fibras de la palmera de azúcar (*Arenga pinnata*) para reforzar bioplástico obtenido a partir del almidón de semillas de aguacate y glicerol. Un análisis morfológico y de las propiedades mecánicas del bioplástico obtenido, reportó que es posible mejorar las condiciones de tracción y elongación al usar el relleno seleccionado.

Otro trabajo realizado sirvió para medir el efecto que tienen los desechos de la cáscara del camarón sobre las propiedades del bioplástico elaborado a base de gluten de trigo. Una comparación del rendimiento de los compuestos de gluten de trigo hechos con diferentes tipos de conchas de camarón reveló que los compuestos con polvo de cáscara de camarón calcinado tienen mejor resistencia a la tracción, propiedades morfológicas y térmicas debido a la estructura de la capa alterada, mayor contenido mineral resultante de la calcinación y una influencia significativa en su proceso de degradación⁵⁰.

Uno de los avances más significativos en el tema analizado, ha sido el uso del PHA, el cual tiene amplia gama de aplicación en diversas industrias, como el sector biomédico, que incluye ingeniería de tejidos, parches de bioimplantes, administración de fármacos, cirugía y vendaje de heridas. Además de ser un recurso renovable y sostenible con un impacto positivo ambiental y social en relación a los plásticos convencionales, tiene como ventaja el no poseer efectos agudos y crónicos sobre la salud cuando se usa *in vivo*⁵¹.

Se ha demostrado que la incorporación de aditivos como glicerol y óxido de zinc en bioplásticos, incide favorablemente en la actividad antimicrobiana y biodegradabilidad, pues inhibe el crecimiento bacteriano teniendo así gran potencial para ser utilizado en el envasado de alimentos⁵².

El desarrollo alcanzado con estos nuevos materiales tiene su origen en los plásticos convencionales, pues sin ellos no existiría el interés de investigar un sustituto con características similares, pero menos agresivo ambientalmente. Para clasifi-

car los distintos plásticos existentes en la actualidad, se elaboró una taxonomía tal como se muestra en la figura 1.

Industria del plástico en el Ecuador y desechos generados

Para el 2016 se tienen registradas 579 empresas dedicadas a la fabricación de productos de plástico, de los cuales un 24,70% producen artículos de plástico para el envasado de productos a partir de materias primas de origen petroquímico⁵³. En lo que se refiere a participación en el mercado, este sector ha tenido un peso promedio de 0,51% frente al total del PIB en los años 2007–2016 y para 2017 se estimó en 0,47%. El Banco Central del Ecuador calcula para este sector un crecimiento de 1% en 2017 y proyecta 2,5% para 2018. En el Ecuador el consumo de plástico per cápita se ubica en 20 kg, siendo bajo si se compara con países como Colombia y Perú donde el consumo es de 24 g y 30 kg, respectivamente⁵⁴. Según la Estadística de Información Ambiental Económica en Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales del año 2016, cada habitante del Ecuador produce en promedio alrededor de 0,58 kilogramos al día de residuos sólidos, en el área urbana⁵⁵.

Una estrategia para motivar el reciclaje de plástico y reducir la contaminación, fue la creación del Impuesto Redimible a las Botellas Plásticas no Retornables (IRBP), con una tarifa de US\$ 0,02 por cada botella plástica gravada. El IRBP se genera por embotellar bebidas alcohólicas, no alcohólicas, gaseosas, no gaseosas y de agua, en botellas plásticas no retornables (PET) y en el caso de bebidas importadas al momento de su desaduanización. Luego el valor gravado se devuelve en su totalidad a quien recolecte, entregue y retorne las botellas⁵⁶.

Antes de adoptar el IRPB, el Ministerio de Ambiente del Ecuador calculó un aproximado de 1200 millones de botellas producidas o importadas que circulaban en el país por año, con un nivel de reciclaje del 39%. Posterior a ello, el nivel de recolección y reciclaje se incrementó al 81% en el primer año de vigencia del tributo, 141,5% en el segundo año y 121,1% en el tercer año. Esto se debió a la introducción de botellas no declaradas oficialmente por los embotelladores e importadores, trayendo una pérdida al Estado por US\$ 12,7 millones entre lo recaudado por concepto de embotellamiento y las devoluciones entregadas a embotelladores y gestores⁵⁷.

Como parte de estas medidas ambientales, se expidieron las políticas generales para la gestión integral de plástico en el Ecuador fundamentadas en el artículo 14 de la Constitución de la República del Ecuador, con el objeto de introducir cambios en la forma de consumo y producción del sector plástico del país. Dichas políticas incluyen que se debe fomentar a nivel nacional la investigación, transferencia de tecnología y desarrollo de bioplásticos y plásticos degradables⁵⁸.

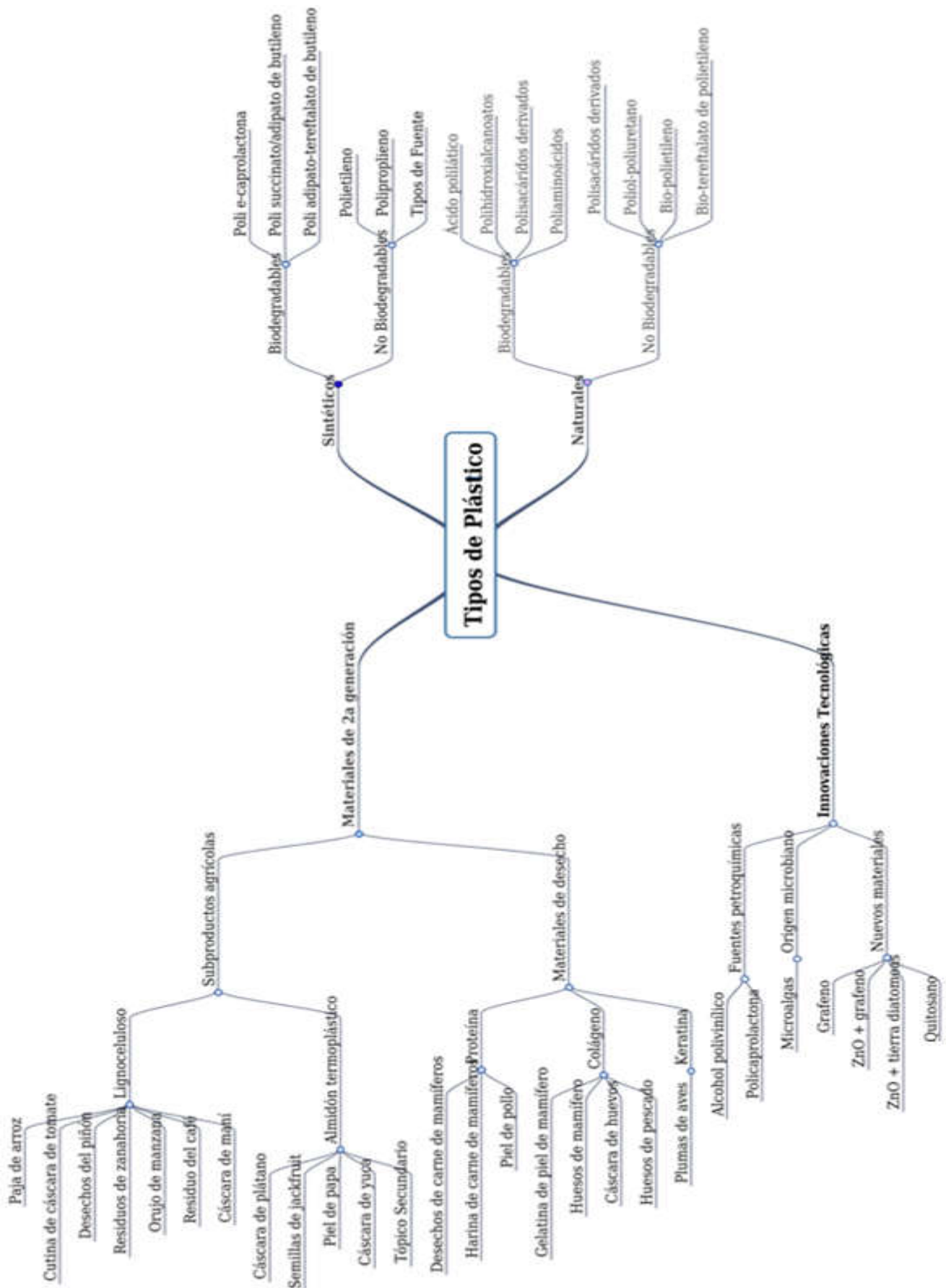


Fig. 1: Una clasificación de los tipos de plásticos.

Producción agrícola del Ecuador

En el Ecuador la agricultura es una de las principales actividades económicas. Tiene importancia no sólo en el ámbito económico sino en la seguridad alimentaria, razón por la cual se ha buscado sostener la producción agrícola lo largo de los años⁵⁹. Para el año 2017 se ocuparon 2.334.721 hectáreas de suelo entre cultivos transitorios, permanentes y barbechos. Los diez principales cultivos fueron cacao, maíz duro seco, palma africana, banano, café, plátano, caña de azúcar, maíz suave seco, maíz suave choclo y frejol seco con 1.737.517 hectáreas, con una producción total de 21.178.970 toneladas⁶⁰.

En cuanto al cultivo de camarón, otro rubro importante de la economía ecuatoriana, reportó el uso de 207 mil hectáreas para esta actividad, generando US\$ 1.434.432 por producción de camarón y US\$ 3.202.811 por procesamiento⁶¹. El procesamiento de estos cultivos, generan desechos que en la mayoría de los casos son desaprovechados. La tendencia actual de la industria, es que esta sea sustentable de manera que se pueda aprovechar los desperdicios generados para crear otros productos que agreguen valor a la cadena de producción.

Una alternativa para utilizar estos residuos agrícolas, es el de usarlos para obtener bioplásticos que sirvan para reemplazar algunos de los polímeros no degradables existentes. Estudios demuestran que es posible usar residuos agroalimentarios incluidos derivados de celulosa, para reemplazar los polímeros convencionales que tienen una tasa de biodegradación lenta, por otros materiales biodegradables⁶².

Considerando que en el Ecuador se genera a nivel nacional un aproximado de 6.660.820 Tm/año de residuos agrícolas⁶³, la fabricación de bioplásticos a partir de estos residuos es una idea atractiva. Para una adecuada elección en el desecho a utilizar es conveniente hacer uso de una herramienta de toma de decisiones, que facilite su elección antes de que se planee la instalación de un proceso industrial de este tipo.

Herramientas de toma de decisión

La producción de un bioplástico a partir de distintos desechos agrícolas, requiere seleccionar el mejor de ellos en función de disponibilidad de recursos, rendimiento del proceso, tecnología existente para su procesamiento, acceso al mercado, rentabilidad, impacto social, impacto ambiental, por citar algunos.

Existen herramientas analíticas que apoyan la toma de decisiones ante escenarios complejos. El análisis multicriterio (MCDA) es una metodología para el análisis de alternativas o variables de decisión, evaluadas a través del cumplimiento de objetivos, y valoradas por criterios cuantitativos o cualitativos⁶⁴.

Ejemplo de ellos son los métodos PROMETHEE (Preference Ranking Organisation Methods for Enrichment Evaluations),

Procesos de Jerarquía Analítica (Analytical hierarchy process, AHP), Medición Atractiva mediante una Técnica de Evaluación basada en Categorías (Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique, MACBETH), ELECTRE (Elimination Et Choix Traduisant la Réalité), Laboratorio de evaluación y ensayo (Decision-Making Trial and Evaluation Laboratory, DEMATEL).

La mayoría de estos métodos parten de la evaluación de criterios por comparaciones de pares basada en juicios de expertos para derivar escalas de prioridad. Emplea ecuaciones matemáticas, apoyadas en un software que en algunos casos emplea ventanas gráficas. Pueden aplicarse de manera individual o una combinación de ellas con excelentes resultados.

El método PROMETHEE (Preference Ranking Organisation Methods for Enrichment Evaluations), es una metodología empleada para facilitar la toma de decisiones en problemas que requieren análisis multicriterio (MCDA)⁶⁵. Una experiencia para el diseño y desarrollo de productos, se muestra en la utilización de PROMETHEE difuso para la selección de materiales usados en la fabricación de tableros de automóviles. Se compararon las variables: límite máximo de temperatura, reciclabilidad, alargamiento, peso, conductividad térmica, resistencia a la tracción fuerza, costo y nivel de toxicidad, del estireno-anhídrido maleico (SMA), policarbonato, polipropileno y acrilonitrilo butadieno estireno (ABS). Al realizar el análisis multicriterios se determinó que el estireno-anhídrido maleico y el polipropileno, eran materiales adecuados para fabricar los tableros de automóviles. Las principales ventajas de esta metodología son la consideración de la incertidumbre y la falta de claridad en el entorno de toma de decisiones⁶⁶.

El AHP es una teoría de evaluación por comparaciones de pares basado en juicios de los expertos para derivar escalas de prioridad. Las comparaciones se realizan usando una escala de juicios absolutos que representa, la dominancia de un elemento con respecto a otro. Las escalas de prioridad derivadas se sintetizan multiplicándolas por la prioridad de sus nodos principales y agregándolo para todos esos nodos⁶⁷.

Se utilizó el método AHP para desarrollar un modelo de estructura de jerarquía general para seleccionar una tecnología apropiada en el tratamiento de desechos sólidos de un municipio de Malasia. Los criterios de selección fueron apoyo político, experiencia técnica, impacto ambiental, mercado potencial, participación de la comunidad y los criterios de costo, dando prioridad al reciclaje, compostaje, incineración o combinación de estas. La combinación del reciclaje y el compostaje fue la mejor alternativa a considerar en el área estudiada⁶⁸.

El método MACBETH (medición del atractivo mediante una técnica de evaluación basada en categorías), es un enfoque de ayuda a la decisión multicriterio interactivo utilizado para construir un modelo de valor cuantitativo, basado en juicios de comparación por pares cualitativos. Está compuesto por

una etapa de entrada de datos donde se obtiene un conjunto coherente de juicios cualitativos con diferentes opciones, y una etapa de salida destinada a construir una escala de valores de intervalo a partir del conjunto de juicios. Su resultado permite medir numéricamente la importancia relativa de las opciones existentes, para la persona o grupo que realizó los juicios⁶⁹.

Se propuso utilizar MACBETH como una herramienta para dar respuesta a las exigencias y desafíos experimentados por la industria de procesos químicos, relacionados con la sostenibilidad, problemas económicos, sociales y ambientales, siendo una alternativa para alcanzar un enfoque de innovación sistemática en este campo⁷⁰. La técnica DEMATEL se utilizó en combinación con otro método para identificar los sitios más favorables en términos de sostenibilidad a largo plazo para la instalación de plantas de generación de energía con biomasa. Los criterios establecidos en este enfoque se describen, evalúan, ponderan y asignan a tres grupos de criterios: ambiental, grupos geofísicos y socioeconómicos. Para la toma de decisión, se realizó un análisis de sensibilidad del conjunto de criterios sugiriendo como mejores las cercanías de bosques en zonas con bajos costos de transporte⁷¹.

El laboratorio de evaluación y ensayo de toma de decisiones (DEMATEL), se considera como un método eficaz para la identificación de los componentes de la cadena causal de un sistema complejo. Se trata de evaluar las relaciones interdependientes entre los factores y encontrar los críticos a través de un modelo estructural visual. Durante la última década, se han realizado una gran cantidad de estudios sobre la aplicación de DEMATEL y representa una de las tendencias actuales de investigación y potencial para futuras⁷².

En una investigación se aplicó el método ELECTRE, para analizar diferentes tipos de bioplásticos y seleccionar la alternativa óptima capaz de ser utilizada para la producción de envases, teniendo en cuenta criterios sociales, económicos y

ambientales. Sobre la base de la aplicación del análisis multicriterio, se concluyó que los bioplásticos, en particular los polihidroxicanoatos, son adecuados desde puntos de vista económicos y ambientales para la fabricación y utilización de envases⁷³.

Dada la característica agrícola que posee el Ecuador representada con una participación del 9,45% en el PIB del país⁷⁴, es posible aplicar un método de análisis multicriterios para seleccionar el desecho generado en este sector, con mayor rendimiento económico al ser utilizado para fabricar bioplástico. Los desechos a evaluar serían los generados por los diez principales cultivos registrados en el país.

Como primeras variables de análisis se plantean las siguientes: disponibilidad del recurso, facilidad tecnológica para su procesamiento, impacto social e impacto ambiental. A su vez cada variable estaría desglosada en distintos criterios, importantes a considerar en el estudio (figura 2).

La utilización de estos desechos, contribuirían con el crecimiento económico del Ecuador por tratarse de un sector con gran participación en el presupuesto nacional. Se favorecería el cuidado y la protección ambiental del país, al brindar una solución para los desechos generados aguas arriba en la actividad agrícola, disminuiría la cantidad de desechos dispuestos en vertedero o bien las emisiones de gases con efecto invernadero. También se podría reducir el desembolso del Estado por concepto de retribución a los colectores de botellas sujetas al pago del IRB y se brindaría la oportunidad al país, de participar en mercados globales donde ya se comercializan este tipo de productos.

En un futuro trabajo se recomienda seleccionar uno de los métodos de MCDA antes descritos, para ponderar las variables señaladas a través de la colaboración de un grupo de expertos en el área, a fin de jerarquizar cada desecho generado y seleccionar el más favorable.

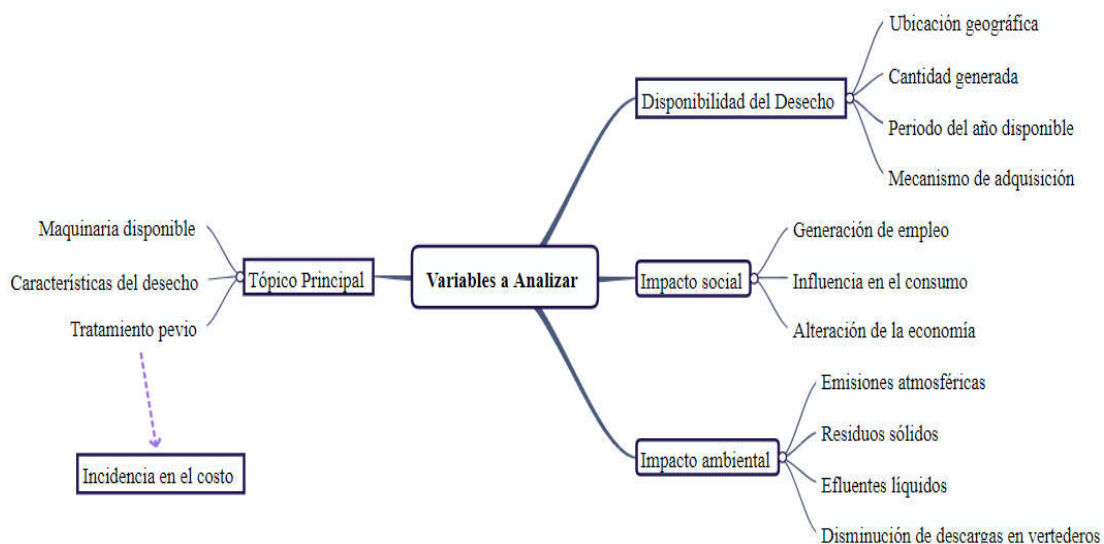


Fig. 2: Variables a analizar en un análisis multicriterios.

Conclusiones

Es posible aprovechar los desechos agrícolas generados en el Ecuador para obtener plásticos biodegradables, que compitan con los sintéticos. Decidir cuál de estos desechos utilizar para lograr un mayor rendimiento, dependerá de distintas variables y su interacción, las cuales podrán ser evaluados a través de una herramienta de análisis multicriterios. En una futura investigación, es conveniente ponderar los criterios de selección para cada desecho a considerar como materia prima en la producción de bioplástico, para someterlo a evaluación con alguno de los métodos MCDA o una combinación de estos.

Referencias

1. PlasticsEurope. Plásticos – Situación en 2017. España (2017). https://www.plasticseurope.org/download_file/force/1452/632%0A.
2. G Roland. Planet or Plastic - Pictures, a Lifetime of Plastic. **National Geographic Magazine**, **42(6)**, 13 (2018).
3. L Parker. Planet or Plastic? **National Geographic Magazine**, **42(6)**, 2-51 (2018).
4. AL Brooks, S Wang, JR Jambeck. The Chinese import ban and its impact on global plastic waste trade. **Science Advance**, **4(6)**, (2018).
5. M Valero-Valdivieso, Y Ortegon, Y Uscategui. Biopolímeros: Avances y Perspectivas Biopolymers: Progress and Prospects. **Dyna**, **80(181)**, 171-180 (2013).
6. B Neto, C Fornari, E da Silva, M Franco N dos Santos, R Ferreira, P de Almeida, K Valverde. Biodegradable thermo-plastic starch of peach palm (*Bactris gasipaes kunth*) fruit: Production and characterisation. **Int. J. Food Properties**, **(20)**, S2429-S2440 (2018).
7. P Pathak, S Mandavgane, N Puranik, S Jambhulkar, B Kulkarni. Valorization of potato peel: a biorefinery approach. **Critical Reviews in Biotechnology**, **38(2)**, 218-230 (2018).
8. C Cecchini. Bioplastics made from upcycled food waste. Prospects for their use in the field of design. **The Design Journal**, **20(1)**, S1596-S1610 (2017).
9. Y Zhang, Q Liu, C Rempel. Processing and characteristics of canola protein-based biodegradable packaging: A review. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, **58(3)**, 475-485 (2018).
10. G Gregory, L Jenisch, B Charles, G Kociok-Köhn, A Buchard. Polymers from sugars and CO₂: Synthesis and polymerization of a d -mannose-based cyclic carbonate. **Macromolecules**, **49(19)**, 7165-7169 (2016).
11. Center for Sustainable Chemical Technologies. Brochure 2018, 34 (2018). http://www.csct.ac.uk/wpcontent/uploads/2018/07/CSCT_Brochure_2018.pdf.
12. E McPhee. Edible wrapping project attracts interest. **Otago Daily Times** (2018) <https://www.odt.co.nz/news/dunedin/campus/university-of-otago/edible-wrapping-project-attracts-interest>.
13. European Bioplastics, Institute for Bioplastics and Biocomposites. Report - bioplastic marked data. **Eur. Bioplastics**, 1-7 (2017).
14. K Encalada. Obtención y caracterización de un material termoplástico a partir de polivinil alcohol y almidón de achira (*Canna edulis*). Escuela Politécnica Nacional, Ecuador (2016).
15. S Iles. Estudio de materiales termoplásticos obtenidos a partir de un copoliéster alifático-aromático y almidón de banano (*Musa paradisiaca*). Escuela Politécnica Nacional, Ecuador (2017).
16. I Pilla. Desarrollo de un material termoplástico obtenido a partir de almidón de oca (*Oxalis tuberosa*) y plastificantes. Escuela Politécnica Nacional, Ecuador (2017).
17. M Marttunen, J Lienert, V Belton. Structuring problems for Multi-Criteria Decision Analysis in practice: A literature review of method combinations. **Eur. J. Operational Res.**, **263(1)**, 1-17 (2017).
18. L Agüero. Hidrogeles sensibles al pH como alternativa al mejoramiento del tratamiento de las enfermedades inflamatorias intestinales pH-sensitive hydrogels as an improved alternative treatment for inflammatory bowel diseases. **Rev. Cubana de Investigaciones Biomédicas**, **35(3)**, 284-294 (2016).
19. T Iwata. Biodegradable and bio-based polymers: Future prospects of eco-friendly plastics. **Angewandte Chemie - International Edition**, **54(11)**, 3210-3215 (2015).
20. J Mike, N Mills. Plastics: Microstructure and Engineering Applications. Butterworth-Heinemann. Gran Bretaña (2005).
21. R Geyer, J Jambeck, K Law. Production, use, and fate of all plastics ever made. **Science Advances**, **3(7)**, 1-5 (2017).
22. N Lucas, C Bienaime, C Belloy, M Queneudec, F Silvestre, J Nava-Saucedo. Polymer biodegradation: Mechanisms and estimation techniques - A review. **Chemosphere**, **73(4)**, 429-442 (2008).
23. M Rubio, J Guerrero. Polímeros utilizados para la elaboración de películas biodegradables. **Temas Selectos de Ingeniería de Alimentos**, **6(2)**, 173-181 (2012).
24. J Camilo, M Lucia, M Paula, R María, H Semillero. Elaboración de una película plástica biodegradable a partir del almidón de yuca y pectina. **Revista CLIC**, **1(1)**, 1-6 (2017).
25. B Puello, L De la Cruz. Obtención de una película biodegradable a partir del olote de maíz para ser utilizada como empaque de alimentos a escala de Laboratorio. Universidad de San Buenaventura, Colombia (2014).
26. M Ortiz, M Villalobos, M Prado, A Peña, T Avalos, M Martínez, J de León. Desarrollo de una película plástica a partir del almidón extraído de papa residual. M Ramos, V Aguilera, (eds). Ciencias de la Ingeniería y Tecnología, Handbook. ERCOFAN. México, 186-193 (2013).
27. P Zamudio, L Bello, A Vargas, J Hernández, C Romero. Caracterización parcial de películas preparadas con almidón oxidado de plátano. **Agrociencia**, **41(8)**, 837-844 (2007).
28. O Rutiaga. Elaboración de películas plásticas flexibles a partir de polímeros naturales como una alternativa de empaque y la

- evaluación de sus propiedades. Universidad Autónoma de Nuevo Leon, México (2002).
29. M Enriquez, R Velasco, V Ortíz. Composición Y Procesamiento De películas biodegradables basadas en almidón. **Biotechnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial**, **10(1)**, 182-192 (2012).
 30. R Jurgen, E Winfried, K Kurt, E Harald, K Joachim. Process for producing thermoplastic starch 6136097, PA, USA (2000).
 31. J Lovett, F De Bie. SUSTAINABLE SOURCING OF FEEDSTOCKS FOR BIOPLASTICS: Clarifying sustainability aspects around feedstock use for the production of bioplastics. Amsterdam. http://www.corbion.com/media/550170/corbion_whitepaper_feedstock_sourcing_11.pdf. (2016)
 32. J Heredia, A Heredia, E Domínguez, R Cingolani, I Bayer, A Athanassiou, J Benítez. Cutin from agro-waste as a raw material for the production of bioplastics. **J. Experimental Botany**, **68(19)**, 5401-5410 (2017).
 33. S Virtanen, R Chowreddy, S Irmak, K Honkapää, L Isom. Food Industry Co-streams: Potential Raw Materials for Biodegradable Mulch Film Applications. **J. Polym. Environment**, **25(4)**, 1110-1130 (2017).
 34. F Bilo, S Pandini, L Sartore, L Depero, G Gargiulo, A Bonassi, S Federici, E Bontempi. A sustainable bioplastic obtained from rice straw. **J. Cleaner Production**, **200**, 357-368 (2018).
 35. R Santana, R Bonomo, O Gandolfi, L Rodrigues, L Santos, A dos Santos, C de Oliveira, R da Costa, C Veloso. Characterization of starch-based bioplastics from jackfruit seed plasticized with glycerol. **J Food Sci. Technol.**, **55(1)**, 278-286 (2018).
 36. N Sultan, W Johari. The development of banana peel/corn starch bioplastic film: a preliminary study. **Bioremediation Science and Technology Research**, **5(1)**, 12-17 (2017).
 37. H Patel, S Seshadri, J Parvathi. Edible Bioplastic with Natural pH Indicators. **Int. J. Current Microbiol. Applied Sci.**, **6(7)**, 1569-1572 (2017).
 38. T Moro, J Ascheri, J Ortiz, C Carvalho, A Meléndez. Bioplastics of Native Starches Reinforced with Passion Fruit Peel. **Food and Bioprocess Technology**, **10(10)**, 1798-1808 (2017).
 39. R Siakeng, M Jawaid, H Ariffin, S Sapuan. Thermal properties of coir and pineapple leaf fibre reinforced polylactic acid hybrid composites. En: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol 368 (2018).
 40. S Miller. Natural fiber textile reinforced bio-based composites: Mechanical properties, creep, and environmental impacts. **J. Cleaner Production**, **(198)**, 612-623 (2018).
 41. D Paiva, A Pereira, A Pires, J Martins, L Carvalho, F Magalhães. Reinforcement of Thermoplastic Corn Starch with Crosslinked Starch/Chitosan Microparticles. **Polymers (Basel)**, **10(9)**, 985 (2018).
 42. M Bakri, E Jayamani, S Hamdan, M Rahman, A Kakar, K Soon. Potential of Borneo Acacia wood in fully biodegradable biocomposites' commercial production and application. **Polymer Bulletin**, **75(11)**, 5333 (2018).
 43. C Chan, L Vandi, S Pratt, P Halley, D Richardson, A Werker, B Laycock. Composites of Wood and Biodegradable Thermoplastics: A Review. **Polymer Reviews**, **58(3)**, 444-494 (2018).
 44. M Harunsyah, R Fauzan. Mechanical properties of bioplastics cassava starch film with Zinc Oxide nanofiller as reinforcement. En: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol 210 (2017)
 45. A Amri, L Ekawati, S Herman, S Yenti, Zultiniar, Y Aziz, S Utami, Bahrudin. Properties enhancement of cassava starch based bioplastics with addition of graphene oxide. En: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol 345 (2018).
 46. R Faradilla, G Lee, J Roberts, P Martens, M Stenzel, J Arcot. Effect of glycerol, nanoclay and graphene oxide on physicochemical properties of biodegradable nanocellulose plastic sourced from banana pseudo-stem. **Cellulose**, **25(1)**, 399-416 (2018).
 47. N Song, X Hou, L Chen, S Cui, L Shi, P Ding. A Green Plastic Constructed from Cellulose and Functionalized Graphene with High Thermal Conductivity. **ACS Appl Mater Interfaces**, **9(21)**, 17914-17922 (2017).
 48. O James, E Wilson. Non-Synthetic Biodegradable Starch-Based Compositon For Production Of Shaped Bodes. **J. Applied Polymer Science**, **2(12)**, 1-6 (2006)
 49. M Sartika, M Lubis, M Harahap, E Afrida, M Ginting. Production of bioplastic from avocado seed starch as matrix and microcrystalline cellulose from sugar palm fibers with Schweizer's reagent as solvent, **Asian J. Chemistry**, **30(5)**, 1051-1056 (2018).
 50. S Thammahiwes, S Riyajan, K Kaewtatip. Effect of Shrimp Shell Waste on the Properties of Wheat Gluten Based-Bioplastics. **J. Polym. Environment**, **26(5)**, 1775-1781 (2018).
 51. Z Raza, S Abid, I Banat. Polyhydroxyalkanoates: Characteristics, production, recent developments and applications. **Int. Biodeterioration & Biodegradation**, **126**, 45-56 (2018).
 52. Y Agustin, K Padmawijaya. Effect of glycerol and zinc oxide addition on antibacterial activity of biodegradable bioplastics from chitosan-kepok banana peel starch. En: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol 223, (2017)
 53. Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. Directorio de Empresas y Establecimientos de Manufactura 2016 (2016). <http://aplicaciones3.ecuadorencifras.gob.ec/VDATOS2-war/paginas/administracion/direcEmpresarial.xhtml>.
 54. Revista EKOS. Producción de plásticos: Un pilar para el encadenamiento productivo. **Rev EKOS**, **287**, 110-120 (2018). <http://www.ekosnegocios.com/negocios/verArticuloContenido.aspx?idArt=10293>.
 55. Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. Según la última estadística de información ambiental: Cada ecuatoriano produce 0,58 kilogramos de residuos sólidos al día. (2018). <http://www.ecuadorencifras.gob.ec/segun-la-ultima-estadistica-de-informacion-ambiental-cada-ecuatoriano-produce-058-kilogramos-de-residuos-solidos-al-dia/>

56. Servicio de Rentas Internas. IMPUESTO REDIMIBLE a las Botellas Plásticas no Retornables. Información sobre impuestos (2011). <http://www.sri.gob.ec/web/guest/impuesto-redimible-botellas-plasticas-no-retornables>.
57. A Galán. Análisis del Impuesto Redimible a las Botellas Plásticas No Retornables en el Ecuador. Universidad Andina Simón Bolívar. Ecuador (2016).
58. Ministerio del Ambiente. Políticas para gestión integral de plásticos en el Ecuador. Ecuador; 1-9 (2014). <http://www.ambiente.gob.ec/wpcontent/uploads/downloads/2018/06/Acuerdo-19.pdf>.
59. A Monteros, R Gaethe, V Lema, C Salazar, R Sanchez, F Llive. *PANORAMA AGROECONÓMICO ECUADOR 2016*. Ecuador, (2016). http://sipa.agricultura.gob.ec/pdf/estudios_agroeconomicos/panorama_agroeconomico_ecuador2016.pdf.
60. INEC - ESPAC. Cifras Agroecónómicas. Ministerio de Agricultura y Ganadería (2017). <http://sipa.agricultura.gob.ec/index.php/cifras-agroproductivas>. Published 2017.
61. ESPAE-ESPOL. Industria de Acuicultura. Estud Ind estratégica para la toma Decis. 10-18 (2018). http://www.espae.espol.edu.ec/wp-content/uploads/2018/01/ei_acuicultura.pdf.
62. I Gonçalves, A Vasconcelos, A Lemos, A Alves. Bioplastics from agro-wastes for food packaging applications. Elsevier Inc. (2017)
63. G Guerrón. Energías renovables panorama nacional- internacional. Inst Nac Efic Energética y Energías Renov. 1-51 (2014).
64. A Degioanni, J De Prada, J Cisneros, A Cantero. Análisis multicriterio discreto: Un método facilitador para la toma de decisiones en el ordenamiento territorial, **Revista Universidad Verdad**, (73), 11-21 (2017).
65. A Kocmanová, M Dočekalová, J Luňáček. PROMETHEE-GAIA Method as a Support of the Decision-Making Process in Evaluating Technical Facilities. En: IFIP Advances in Information and Communication Technology. Vol 413 (2013).
66. M Gul, E Celik, A Gumus, A Guneri. A fuzzy logic based PROMETHEE method for material selection problems. **Benisuef University Journal of Basic and Applied Sciences**, 7(1), 68-79 (2018).
67. Saaty TL. Decision making with the analytic hierarchy process. **Int. J. Services Sciences**, 1(1), 83-98 (2008).
68. M Abu, L Abd, A Aris, W Sulaiman. Solid Waste Management: Analytical Hierarchy Process (AHP) Application of Selecting Treatment Technology in Sepang Municipal Council, Malaysia, **Current World Environment**, 6(1), 1-16 (2011).
69. C Bana, J de Corte, J Vansnick. MACBETH (Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique). En: Wiley Encyclopedia of Operations Research and Management Science (2011)
70. I João, J Silva. TRIZ and MACBETH in chemical process engineering. **Int. J. Systematic Innovation**. 4(4), 15-25 (2017).
71. J Jeong, Á Ramírez. Optimizing the location of a biomass plant with a Fuzzy-DEcision-Making Trial and Evaluation Laboratory (F-DEMATEL) and multi-criteria spatial decision assessment for renewable energy management and long-term sustainability. **J. Cleaner Production**, 182(1), 509-520 (2018).
72. S Si, X You, H Liu, P Zhang. DEMATEL Technique: A Systematic Review of the State-of-the-Art Literature on Methodologies and Applications. **Mathematical Problems in Engineering**, 1-33 (2018)
73. E Comaniță, C Ghinea, R Hlihor, I Simion, C Smaranda, L Favier, M Rosca, I Gostin, M Gavrilescu. Challenges and opportunities in green plastics: An assessment using the electre decision-aid method, **Environ. Eng. Manag. J.**, 14(3), 689-702 (2015).
74. Banco Mundial. Agricultura, valor agregado (% del PIB). Datos sobre las cuentas nacionales del Banco Mundial y archivos de datos sobre cuentas nacionales de la OCDE (2017). <https://datos.bancomundial.org/indicador/NV.AGR.TOTL.ZS>.