

Revisión - Aprovechamiento de los residuos de la agroindustria del café en la elaboración de materiales compuestos de matriz polimérica

Review - Use of residues from the coffee agro-industry in the manufacture of polymer matrix composite materials.

William Urrego Yepes¹, Maria Jose Godoy Pernaleté ²

¹Magister en ingeniería. Docente del programa de Ingeniería de producción. Instituto Tecnológico Metropolitano (ITM). Grupo de investigación en calidad, metrología y producción, Línea de manufactura sostenible, Medellín, Colombia. williamurrego@itm.edu.co. : <http://orcid.org/0000-0003-2279-895X>

²Estudiante de Ingeniería de Producción. Instituto Tecnológico Metropolitano (ITM). Grupo de investigación en calidad, metrología y producción, Línea de manufactura sostenible, Medellín-Colombia. mariagodoy264366@correo.itm.edu.co. <http://orcid.org/0000-0002-7909-6353>

Recibido: 04/12/2020

Aceptado: 08/05/2021

Cite this article as: W. Urrego-Yepes, M. Godoy Pernaleté “Revisión - Aprovechamiento de los residuos de la agroindustria del café en la elaboración de materiales compuestos de matriz polimérica”, Prospectiva, Vol 19, N° 2, 2021.

<https://doi.org/10.15665/rp.v19i2.2590>

RESUMEN

Durante el proceso productivo del café se generan una gran cantidad de residuos orgánicos, los cuales si no se disponen correctamente pueden causar daños considerables al medio ambiente. En cada etapa del proceso de producción del café se obtienen diferentes residuos con distintas propiedades, lo que hace que se puedan utilizar en diferentes áreas. Gracias al aprovechamiento de estos residuos, se han podido generar nuevos productos en áreas como la farmacéutica, alimenticia, de la construcción, en la generación de biocombustibles, y en la industria polimérica como refuerzo de algunos tipos de polímeros. En esta revisión se analizan los estudios existentes sobre materiales compuestos poliméricos reforzados con algunos residuos del café como la cascarilla del café, la piel plateada y el café molido; en cada uno de ellos se reportaron mejoras en algunas propiedades. En todos los casos, ocurrió un aumento en la resistencia a la tracción y aumento del módulo, lo que demuestra que los materiales compuestos poliméricos reforzados con los residuos del café son una gran opción para el aprovechamiento de estos residuos.

Palabras claves: Residuos agroindustriales; Aprovechamiento de residuos; Café; Materiales poliméricos; Sostenibilidad.

ABSTRACT

During the coffee production process, a large amount of organic waste is generated, which if not disposed correctly can cause considerable damage to the environment. At each stage of the coffee production process, different types of residues with different properties are obtained, which means that they can be used in different areas. Due to the use of these residues, new products have been generated in areas such as pharmaceuticals, food, construction, in the generation of biofuels, and in the polymer industry as reinforcement of some types of polymers. In this review, existing studies on polymeric composites reinforced with some coffee residues such as coffee husk, silver skin and ground coffee are analyzed; in each of them there were improvements in some properties. In all cases, there was an increase in tensile strength and an increase in modulus, which shows that polymeric composite materials reinforced with coffee residues are a great option for the use of these residues.

Keywords: Agro-industrial waste; Waste management; Coffee; Polymeric materials; Sustainability.

1. INTRODUCCIÓN

A partir de los granos de café se produce una de las materias primas con más auge en el comercio internacional, consolidándose con una producción promedio anual de 7 millones de toneladas de granos de café según la Organización Internacional del café [1]–[3]. Cerca del 80% de la producción total del café es comercializada internacionalmente. Debido a la alta demanda, las empresas comercializadoras del rubro agrícola manejan altos estándares de calidad para la exportación de este [2].

A inicios del siglo XX, algunos países de América Latina fueron los principales productores de café a nivel mundial, tales como: Colombia, Guatemala, Brasil y México. Sin embargo, a finales de ese siglo, algunos países desarrollados ingresan al mercado del café, generando de esta manera una mayor oferta del producto; y por lo tanto, los países pioneros sufren una disminución en su porcentaje de producción [2], [4], [5]. En Colombia, desde hace muchos años el café ha sido parte fundamental en el desarrollo económico del país, [6], [7] debido a que es catalogado por los consumidores como uno de los mejores en el mundo, gracias a su gran calidad en el grano y como producto final [8].

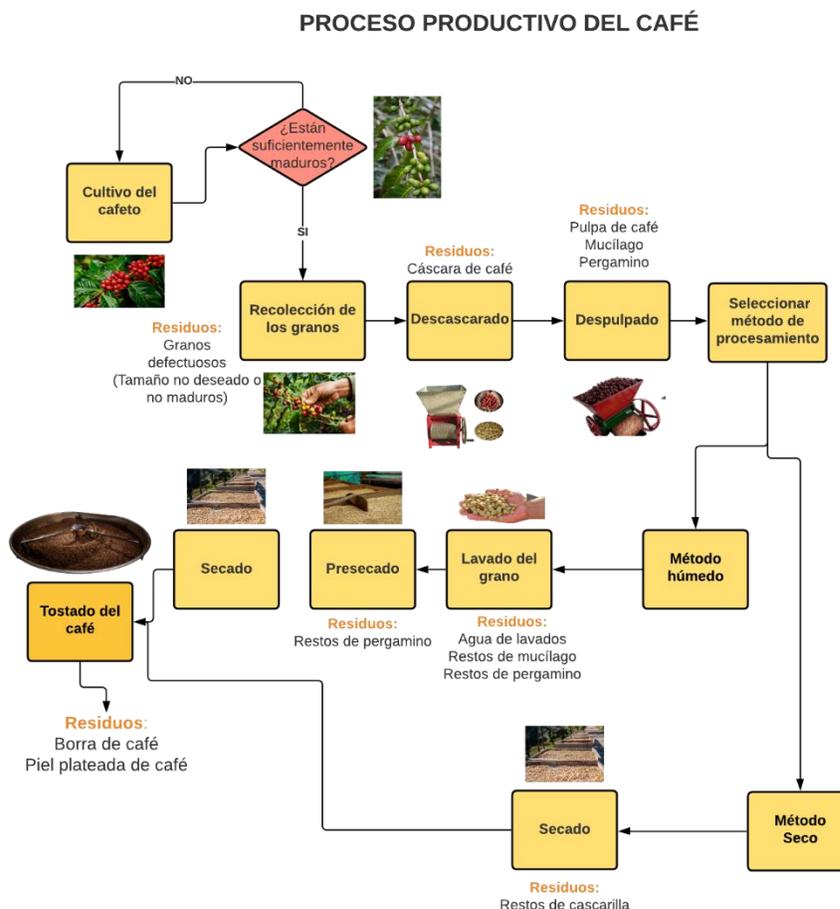
El negocio del café en Colombia contribuye con alrededor del 1% del PIB del país; y adicionalmente este sector aporta cerca del 3% de la generación de empleos [4], representando el sustento principal para una gran cantidad de caficultores y sus familias. El mayor porcentaje de caficultores forman parte de la Federación Nacional de Cafeteros, quien regula la producción del café de tal manera que sea posible cumplir con altos estándares de calidad, los cuales son necesarios para poder continuar siendo uno de los principales países productores de café a nivel mundial [7], [9]. A pesar de los aumentos de competitividad en el mercado que han afectado la producción de café en Colombia, el sector cafetero ha seguido en constante mejoramiento de la cadena de valor, al industrializar e innovar varias etapas del proceso, generando un aumento en el desarrollo económico de las zonas productoras del rubro [3], [10].

La obtención del café comercializado se lleva a cabo a través de una serie de etapas de transformación que le dan al grano de café la forma y la calidad deseada del producto final. La cadena de abastecimiento se constituye de ocho pasos fundamentales desde el cultivo del cafeto hasta el café procesado, las cuales son: cultivo del cafeto, recolecta de los granos de café, descascarado, despulpado, lavado y limpiado del grano, pre secado y secado al sol o húmedo [11]. Los pasos fundamentales de la cadena de abastecimiento desde el cultivo del cafeto hasta el café procesado son esquematizados en la figura 1.

En la agroindustria del café se generan residuos o subproductos los cuales pueden sumar entre el 30%-50% de la producción total. En los países con mayor producción de café se genera una cantidad considerable de desechos que contribuye en gran escala a la contaminación y a problemas ambientales debido al alto contenido de compuestos perjudiciales tales como cafeína, alcaloides, taninos y polifenólicos [12]. De esta manera, han surgido una serie de investigaciones para utilizar los residuos generados en este sector agroindustrial como materia prima para la generación de otros productos [13], [14].

Los residuos obtenidos en el proceso productivo del café pueden ser de gran utilidad en determinadas industrias, estos pueden ser líquidos o sólidos [12], [15]. En el método seco, la primera parte del proceso que va desde el cultivo hasta el secado genera los siguientes residuos: la cáscara del café, que está compuesta por la piel exterior del grano del café, la pulpa y el pergamino, y los granos de café que no cumplen con los estándares de tamaño o maduración requeridos. En el método húmedo, no se realiza el proceso de secado, por lo que los residuos generados son la pulpa de café, compuesta por la piel externa del grano y su pulpa, los granos defectuosos, agua de lavados, mucílago y pergamino [15]–[17]. En la etapa del tostado del café, ubicada en la parte final del proceso, se genera parte de los principales residuos de esta agroindustria, los cuales son: la borra de café y la piel plateada de café [18]. Todos los residuos mencionados son altamente contaminantes debido a su gran contenido de cafeína, alcaloides, taninos y polifenoles que son sumamente dañinos para el medio ambiente [12].

Figura 1. Esquema del proceso productivo del café y los residuos generados en cada una de las etapas.
Figure 1. Outline of the coffee production process and the wastes generated in each of the stages.



Entre las investigaciones realizadas para mitigar la problemática ambiental se han analizado los diferentes usos posibles de los residuos, algunos de éstos son: suplemento en las comidas de animales [19], [20], bienes alimenticios como colorantes naturales, saborizantes y biocéuticos [20], [21], control de infecciones de hongos en la cosecha y en postcosecha [20], prevención de diversas enfermedades relacionadas a deficiencias cardiovasculares, cáncer, obesidad y diabetes a través de bebidas [22], [23], carbón activo [14], [24], [25], combustible para producir energía [26]–[29] y refuerzos en polímeros termoplásticos debido a que puede mejorar el rendimiento mecánico de los materiales compuestos, también por su resistencia al fuego, aislamiento térmico, entre otras características tecnológicas de estos materiales [1], [14], [30].

En el presente trabajo, se realiza la revisión de los diferentes usos de los residuos obtenidos en la industria agrícola del café mencionados con anterioridad, y principalmente enfocados al uso de dichos residuos para la elaboración de materiales compuestos poliméricos.

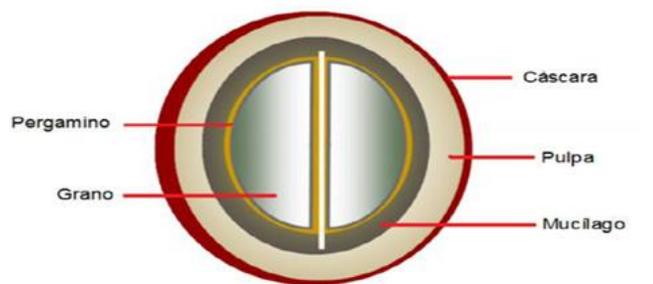
2. APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS DE LA AGROINDUSTRIA DEL CAFÉ

El grano del café está constituido por diferentes partes, las cuales luego de ser procesadas industrialmente generan gran cantidad de residuos que deben disponerse de manera adecuada con el propósito de evitar la

generación de un impacto negativo en el medio ambiente. En la figura 2 se esquematizan las partes del grano del café.

Figura 2. Partes del grano de café [31]

Figure 2. Parts of the coffee bean [31]



Como se mencionó anteriormente, los procesos agroindustriales empleados para el aprovechamiento de los granos del café pueden realizarse mediante métodos secos o húmedos. A continuación, se describen los residuos generados en los métodos seco y húmedo de beneficio del café, y adicionalmente se establecen posibles aplicaciones de dichos residuos en diferentes áreas.

Método seco

Cascarilla de café

La cascarilla de café representa el 12% aproximadamente del grano del cafeto, está constituida por la piel exterior, la pulpa del grano y el pergamino. Su contenido está compuesto por lignina, celulosa, pentosanos, sílice y cenizas [31]. La cascarilla de café es uno de los residuos más estudiados para su aprovechamiento. Por sus buenas características higrotérmicas, la cascarilla de café puede ser utilizada en materiales para la construcción, como por ejemplo en la elaboración de paneles aislantes del sonido y el calor. Los paneles elaborados con la cascarilla de café presentaron una excelente transferencia de humedad, característica fundamental en esta industria; sin embargo, Buratti et al establecen que se deben realizar estudios más profundos ya que los paneles elaborados con este material podrían incurrir en un aumento de la pérdida de calor y puntos acústicamente débiles [32]. Por otra parte, la cascarilla de café ha sido estudiada y utilizada como adsorbente de bajo costo teniendo buenos resultados; por ejemplo, fue utilizada como adsorbente para eliminar el azul de Metileno en aguas residuales [33]. Debido a su gran contenido de polifenoles, la cascarilla de café también ha sido utilizada como inhibidor de la corrosión del acero; para lograr este propósito y alcanzar hasta un 98% de efectividad, la cascarilla se utiliza junto con ácido sulfúrico [34]. En la industria de la salud, la cascarilla de café también juega un papel importante, debido a que contiene enzimas que controlan la glucosa, por lo que puede ser utilizado como regulador para la diabetes y por su contenido de cafeína como antiinflamatorio o regulador de obesidad [35].

Uno de los usos más importantes de la cascarilla de café como materia prima en nuevos productos, ha sido en el sector de materiales poliméricos; materiales que debido a su versatilidad y en algunos casos bajos costos, presentan muy buenas opciones para su utilización. Con la intención de crear materiales amigables con el medio ambiente, la cascarilla de café ha sido utilizada como relleno en la matriz polimérica de Polietileno y Polipropileno, teniendo muy buenos resultados con respecto a las propiedades del material compuesto. Algunos de los cambios de las propiedades estuvieron asociados con la resistencia a la tracción, aumento de la resistencia a la flexión, aumento de la rigidez y mejora en la estabilidad del compuesto bajo altas temperaturas [30], [36], [37]. Posteriormente se profundizará en este tema, en la sección relacionada

con la utilización de los residuos de la agroindustria del café en la elaboración de materiales compuestos de matriz polimérica. En la tabla 1 se resumen los posibles que tiene la cascarilla de café generada como subproducto agroindustrial.

Tabla 1. Posibles usos para la cascarilla de café.

Table 1. Possible uses for coffee husk.

Residuo	Uso posible (Aprovechamiento)	Referencias
Cascarilla de café	<ul style="list-style-type: none"> • Materiales para construcción • Adsorbente • Inhibidor de corrosión • Regulador de diabetes y obesidad • Antiinflamatorio • Refuerzo en matrices poliméricas 	[30]–[37]

Método húmedo

Mucílago

El mucílago o mesocarpio de la fruta del café está ubicado entre el pergamino y la pulpa. Se estima que aproximadamente el 22% del fruto completo del café, es mucílago. Esta capa que cubre el grano de café no contiene cafeína y es rica en azúcares como la glucosa y sacarosa. Al contar con estas características, el principal uso del mucílago ha sido la sustitución de ingredientes para la creación de bloques de alimentación animal como cerdos y rumiantes. Se han obtenido resultados exitosos al adicionarle más del 70% de mucílago en lugar de endulzantes como la melaza o sustitución de concentrados del 100% al 74% [38], [39].

Por otra parte, el mucílago junto con la pulpa puede ser aprovechados para la generación de metano a través de procesos anaeróbicos, en la producción de biohidrógeno con altos rendimientos o sólo el mucílago para la generación de etanol; de esta manera se logra un impacto positivo en el medio ambiente gracias al aprovechamiento de este residuo [40], [41], [42].

Pergamino

El pergamino está compuesto por hemicelulosa, celulosa, cenizas y lignina. Al contener considerables cantidades de lignina, puede ser de gran utilidad como antifúngico en la protección de alimentos o plantas. Sin embargo, aún continúan estudios para otras aplicaciones, debido a que ha sido considerado como tóxico en dosis de pergamino puro [43], [44].

Pulpa de café

La pulpa de café, al igual que otros residuos provenientes de la cadena productiva del rubro agrícola, contiene polifenoles. Sin embargo, en este residuo se concentra un porcentaje mayor debido al tiempo y a la temperatura que sufren mediante el procesamiento. Gracias a la gran cantidad de polifenoles, la pulpa de café tiene un gran potencial para ser materia prima en productos para controlar o reducir la posibilidad de padecimiento de algunas enfermedades como la diabetes y la obesidad. Por otra parte, al extraer los compuestos bioactivos de la pulpa de café estos pueden ser de gran aprovechamiento en la industria alimentaria, farmacéutica y cosmética [23]. Uno de los principales usos de la pulpa de café ha sido en la fabricación de jugos, mermeladas y la elaboración de harina de pulpa para la creación de alimentos. Esto

por su rico contenido de polifenoles y cafeína y porque no existen estudios que demuestren que tenga algún contenido tóxico en su composición [12], [43], [45]. Adicionalmente, la pulpa de café ha sido utilizada como materia prima en la industria artesanal en la elaboración de papel amate, el cual es un tipo de papel muy antiguo utilizado como fondo para pinturas artísticas, elaborado de corteza del árbol amate [46]. En la tabla 2 se resume el aprovechamiento realizado a diferentes residuos de la agroindustria del café, generados cuando se emplean métodos húmedos.

Tabla 2. Posibles usos de los residuos generados durante la producción de café empleando métodos húmedos.

Table 2. Possible uses of waste generated during coffee production using wet methods.

Residuo	Uso posible (Aprovechamiento)	Referencias
Mucílago	<ul style="list-style-type: none"> • Endulzante en alimentos para animales • Sustituto de concentrados en alimentación animal 	[38]–[42]
Pergamino	<ul style="list-style-type: none"> • Antifúngico en plantas y animales 	[43], [44]
Pulpa de café	<ul style="list-style-type: none"> • Materia prima en productos reguladores o preventivos del padecimiento de diabetes y obesidad • Ingrediente principal en jugos, mermeladas y harina de pulpa de café • Materia prima en la elaboración de papel amate 	[12], [23], [43], [45], [46]

Tostado del café

Piel plateada

Luego del proceso de secado, el grano de café se pasa por un cilindro acanalado de hierro fundido donde se procede a retirar el pergamino y la capa plateada del mismo, en esta etapa pasan a ser desperdicio. El café plateado es rico en fibras como celulosa, hemicelulosa y lignina, teniendo una cantidad considerable de fibra dietética. Además, contiene compuestos fenólicos que hacen que tenga una gran actividad antioxidante. Sus principales usos pueden ser en la industria alimenticia, como colorante natural y como bebidas antioxidantes [20], [21], [43]. Adicionalmente, por su bajo contenido de cafeína y alto en polifenoles, sería de gran utilidad como materia prima en los productos que contienen ácido clorogénico, los cuales ayudan a regular la glucosa y a la reducción de colesterol en las personas [47]. Por otra parte, al unirse con el café molido se puede utilizar como biocombustible, aunque sus resultados son inferiores comparado con los combustibles comúnmente utilizados; sin embargo, este biocombustible cumple su función básica y adicionalmente es amigable con el medio ambiente [48]. De acuerdo con el estudio realizado por Sarasini et al, se demuestra que la piel plateada de café también puede ser utilizada como refuerzo en matrices bio-poliméricas,

mejorando propiedades como el módulo a la tracción, grado de cristalinidad y la temperatura de reblandecimiento Vicat [49].

Café Molido

Una vez el café es secado y tostado se procede a moler el grano proveniente de los pasos anteriores. El desecho del café molido o borra de café, luego de varias etapas de transformación puede ser convertido en un biodiesel, combustible pellets, dihidrógeno y etanol gracias a su alto contenido de ácidos grasos libres y su gran poder calorífico en comparación a otros residuos agrícolas [48]–[50]. En la tabla 3 se muestran los posibles usos de los residuos generados durante el tostado del café.

Tabla 3. Posibles usos de los residuos generados durante el tostado del café.

Table 3. Possible uses of waste generated during coffee roasting.

Residuo	Uso posible (Aprovechamiento)	Referencias
Piel plateada	<ul style="list-style-type: none"> • Colorante natural • Bebidas antioxidantes • Regulador de glucosa • Reductor de colesterol • Biocombustible (En unión con el café molido) • Refuerzo en matrices poliméricas 	[20], [21], [43], [47]–[49]
Café molido	<ul style="list-style-type: none"> • Biodiesel • Combustible en Pellets • Dihidrógeno • Etanol 	[48], [50]

3. RESIDUOS DE LA AGROINDUSTRIA DEL CAFÉ USADOS PARA LA ELABORACIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ POLIMÉRICA

Cada vez más los residuos provenientes de las agroindustrias son estudiados y analizados para su posible aprovechamiento en la fabricación de materiales compuestos, logrando de esta manera, la generación de materiales amigables con el medio ambiente y a su vez con muy buenas propiedades para su utilización en diferentes industrias. Algunos de los residuos han sido estudiados y utilizados como refuerzo de materiales de construcción y otros como refuerzos en matrices poliméricas.

Los residuos provenientes del proceso productivo del café que son utilizados en la fabricación de materiales compuestos son: La cascarilla de café, la piel plateada y el café molido, siendo los dos primeros los que mejor se adaptan a las características deseadas de los materiales; debido a que, si se compara la piel plateada con el café molido, la primera tiene una estructura más densa, posee una mayor estabilidad térmica y tiene un menor grado de ácidos grasos en su composición, lo que hace de la piel plateada una de las mejores opciones para la incorporación en materiales compuestos de matriz polimérica, de igual manera que la cascarilla de café [1], [14], [30], [37], [49], [51], [52].

La cascarilla de café fue utilizada como refuerzo en una matriz de polietileno de baja densidad (PEBD), en este estudio se comparó el efecto de la adición de la cascarilla de café con carbonato de calcio (CaCO₃) y sílice (SiO₂). Los autores utilizaron 20% y 40% de cascarilla de café, y además emplearon anhídrido

Maleico con el propósito de mejorar la interacción entre las cargas y la matriz polimérica. Inicialmente se realizó una caracterización fisicoquímica de la cascarilla de café, donde se identificó cerca de un 6% de cenizas (inorgánicos) y cerca de un 94% de materia orgánica; luego la cascarilla fue llevada a un proceso de deslignificación con el propósito de mejorar la interacción entre los materiales. Los compuestos fueron obtenidos usando un reómetro de torque y luego fueron inyectadas con el propósito de fabricar las probetas para los ensayos mecánicos. Se encontró que la resistencia a la tracción y el módulo de elasticidad aumentaron al adicionar la cascarilla de café; sin embargo, la elongación máxima disminuyó como resultado de la adición de la cascarilla. Por otra parte, los materiales compuestos reforzados con cargas inorgánicas presentaron mayores densidades que los compuestos elaborados con los residuos de la cascarilla de café. Con relación a las propiedades térmicas de los compuestos, se encontró que, al adicionar la cascarilla de café, aumenta la temperatura de fusión, mientras que la entalpia de fusión y la cristalinidad disminuyen [30].

La cascarilla de café también ha sido utilizada como refuerzo en una matriz polimérica de polipropileno, con el propósito de utilizar los materiales compuestos resultantes en placas para techos. En este caso la cascarilla de café no fue sometida a ningún tratamiento químico inicial. Las placas de los materiales compuestos fueron elaboradas mediante moldeo por compresión y las proporciones de cascarilla de café empleadas en la elaboración de los materiales compuestos fueron de 70%, 80% y 90%. Los compuestos elaborados presentaron un buen comportamiento mecánico, presentando la mejor resistencia a la tensión los compuestos elaborados con 80% de cascarilla, mientras que el módulo de rigidez fue mejor para los compuestos elaborados con 70% de cascarilla, disminuyendo este último a medida que se aumentó el porcentaje de cascarilla de café en los compuestos. Con relación a la resistencia a la flexión, el módulo más alto y la mayor resistencia fueron presentadas por los compuestos elaborados con 80% de cascarilla de café. Otros resultados muy interesantes fueron la conductividad térmica, la cual se mantuvo dentro de los estándares; y la retardación a la llama, donde se encontró que la llama se autoextinguía en 15 segundos [1].

En otro estudio, se elaboraron compuestos utilizando una matriz polimérica del polietileno de alta densidad (PEAD) reforzada con cascarilla de café y con fibra de madera. La cascarilla de café fue adicionada en diferentes porcentajes en las formulaciones de los materiales compuestos, los porcentajes empleados de la cascarilla de café fueron de 40,50,60 y 70%. Se empleó polietileno funcionalizado con anhídrido maleico (PEAM) como agente compatibilizante de las fibras con la matriz polimérica. Con el propósito de seleccionar el tamaño de partícula de residuos y acondicionar el % de humedad de estos, se realizó un proceso de tamizado y uno de secado a 103°C durante 24 horas. Las mezclas y las probetas de ensayos se realizaron en un reómetro de torque y en una extrusora. El rendimiento mecánico de los compuestos elaborados con la cascarilla de café fue muy bueno en cuanto a la resistencia y a los módulos de rigidez en tensión y en flexión, donde tanto la resistencia como los módulos aumentaron de manera proporcional como resultado de la adición de la cascarilla de café; sin embargo, la resistencia al impacto y la elongación en rotura disminuyeron como resultado de la adición de los residuos. Con relación a las propiedades térmicas, la resistencia al suavizado Vicat aumentó a medida que se incrementaba el porcentaje de cascarilla de café en los compuestos. A pesar de todos los resultados positivos obtenidos en los materiales compuestos al adicionar la cascarilla de café, se encontró que estos materiales presentan una baja resistencia al agua [14].

En los estudios realizados por Huang et al, y por Urrego et al, se emplearon matrices de polietilenos de alta y baja densidad respectivamente. En los dos estudios se reportan resultados similares en cuanto a la resistencia mecánica de los compuestos al adicionar cascarilla de café, donde la resistencia y el módulo de rigidez en tensión aumentaron, mientras que la elongación máxima disminuyó [14], [30].

Por su parte, la piel plateada del café ha sido utilizada para crear un material compuesto en la fabricación de cápsulas de café, donde su función es ser un agente de refuerzo al unirlo a la matriz polimérica de PHBV (3-hidroxi-butirato-co-3-hidroxi-valerato), plastificada con ATBC (Acetil tributilo citrato). El primer paso para la fabricación del material fue introducir en un horno la piel plateada de café a 110°C durante 24 horas, proceso que fue realizado antes de incorporar los residuos en la matriz polimérica. Luego se utilizó una

extrusora doble husillo co-rotativa para la manufactura de los prototipos de ensayo y para preparar las mezclas que fueron inyectadas con el propósito de elaborar las capsulas de café. Al adicionar la película plateada de café en porcentajes de 5,7.5,10 y 12.5%, se observó que la fluidez en fundido de los compuestos disminuyó, de igual manera que ocurrió con las temperaturas de cristalización, mientras que la temperatura de fusión se mantuvo prácticamente constante. De otra manera, la cristalinidad, de los compuestos aumentó como resultado de la adición de la película plateada de café. Con relación a las propiedades mecánicas, el módulo de rigidez aumentó en función de la proporción del residuo de café, mientras que la resistencia y la elongación al rompimiento disminuyeron en la medida que se aumentó el porcentaje de residuos [51].

En otro estudio, Fabrizio Sarasini et al. fabricaron a partir de un biopolímero comercial de 65% PBAT y 35% PHBV un material compuesto reforzado con piel plateada de café, las proporciones empleadas de la piel plateada fueron de 10,20 y 30%. Inicialmente la película plateada de café fue molida y tamizada. Se emplearon dos tipos de tamaños de residuos, uno es el del residuo sin ningún tratamiento de conminución, mientras que el segundo tamaño corresponde al residuo obtenido después del proceso de molienda. Posteriormente la piel plateada de café fue mezclada con los biopolímeros en una extrusora, y luego la mezcla fue inyectada con el propósito de fabricar los especímenes de ensayo. Los compuestos mostraron un buen comportamiento mecánico, donde se observó que la resistencia a la tensión y el módulo en tensión aumentaron en función de la cantidad de película plateada de café y del tamaño de partícula. Se encontró que la temperatura de suavizado Vicat aumentó en función de la cantidad de residuos de café empleados [49].

Por su parte, Grazia Totaro et al. emplearon biopolímeros como el ácido poliláctico (PLA) y polibutileno succinato (PBS) para fabricar compuestos mezclados con piel plateada de café. En este estudio se emplearon tres proporciones del residuo de café para la fabricación de los materiales compuestos, las cuales fueron de 10, 20 y 30%. Para disminuir el tamaño del residuo proveniente de la agroindustria del café, se realizó un proceso de molienda en un molino de bolas; posteriormente todos los materiales fueron llevados a un proceso de secado al vacío a 60°C durante 12 horas con el propósito de eliminar la humedad de las materias primas. Los resultados de los ensayos mecánicos mostraron que, al adicionar la película plateada de café, el módulo de rigidez en tensión aumentó, mientras que la resistencia a la tensión y la elongación al rompimiento disminuyeron. Finalmente se pudo establecer que las temperaturas de descomposición y las temperaturas de transición vítrea (Tg) disminuyeron como efecto de la adición de la película plateada de café, mientras que la cristalinidad de los compuestos aumentó [52].

La cascarilla de café molida fue empleada en proporciones de 20, 30 y 40% en una matriz de polipropileno (PP). Para mejorar la interacción entre los residuos y la matriz polimérica, se empleó un compatibilizante del PP maleatado. La cascarilla de café fue molida en un molino de cuchillas antes de ser mezclada con el polímero. Para la realización de las mezclas, se utilizó una extrusora doble husillo, y posteriormente se realizó la inyección de las probetas de ensayo. Como resultado de la adición de los residuos, los compuestos presentaron mayores módulos en flexión y en tensión, y una mayor resistencia a la flexión; sin embargo, la resistencia a la tensión, la resistencia al impacto y la deformación en el punto de rotura disminuyeron. Con relación a las propiedades térmicas, la adición de la cascarilla de café no afectó la temperatura de fundido del PP, mientras que generó un aumento en el grado de cristalinidad y en la velocidad máxima de degradación de los compuestos [37]. En la tabla 4 se resumen los estudios reportados sobre el aprovechamiento de los residuos generados en la agroindustria del café en la elaboración de materiales compuestos de matriz polimérica.

Tabla 4. Resumen de estudios reportados sobre aprovechamiento de los residuos de la agroindustria del café en la fabricación de compuestos de matriz polimérica.

Table 4. Summary of studies reported on the use of wastes from the coffee agroindustry in the manufacture of polymeric matrix composites.

Características y propiedades	Materiales, tipo de residuo, (porcentaje de residuo)	Tratamientos físicos o químicos	Métodos de manufactura - procesamiento	Propiedades mecánicas	Otras propiedades
<i>Autores [Referencia]</i>					
<i>Almeida Leal et al [37]</i>	Polipropileno (PP), PP con anhídrido maleico, cascarilla de café (20, 30 y 40%)	Reducción de tamaño en molino de cuchillas	Extrusora doble husillo, Inyección para el moldeo de las piezas de ensayo	↑ La resistencia a la flexión y los módulos en flexión y tensión. ↓ Impacto, deformación en rotura y resistencia a la tensión	↔ temperatura de fundido del PP, ↑ cristalinidad y velocidad máxima de degradación
<i>Huang et al [14]</i>	Poliétileno (PEAD), PE con anhídrido maleico, cascarilla de café (40,50,60 y 70%) y fibra de madera	Proceso de separación de tamaños mediante tamizado, secado de la cascarilla a 103°C durante 24 horas	Reómetro de torque y extrusión	↑ La resistencia y el módulo en tensión y en flexión, ↓ la resistencia al impacto y la elongación máxima	↑ Propiedades térmicas, como por ejemplo la temperatura de suavizado Vicat. Pobre resistencia al agua
<i>Ilangovan et al [1]</i>	Polipropileno (PP), cascarilla de café (70,80 y 90%)	NA	Moldeo por compresión	Mejor resistencia en tensión y en flexión para formulaciones con 80% de cascarilla, mayor modulo en tensión para 70%	Conductividad térmica dentro de los límites del estándar TS805 EN601, ↑ respuesta frente a la llama, se autoextingue en 15 segundos
<i>Sarasini et al [49]</i>	Biopolímeros (65%PBAT-35% PHBV), película plateada de café (10,20 y 30%)	Proceso de molienda y posterior tamizado	Extrusión y moldeo por inyección	↑ la resistencia y el módulo en tensión, influye el tamaño de partícula en la respuesta mecánica, ↓ elongación en rotura	↑ la temperatura de suavizado Vicat, se presentan cambios en la entalpia de fusión y en la cristalinidad
<i>Urrego et al [30]</i>	Poliétileno lineal (PELBD), cascarilla de café (20 y 40%), CaCO ₃ , SiO ₂ y	Procesos de secado, tamizado, deslignificación de la cascarilla, funcionalización con	Reómetro de torque y moldeo por inyección para las probetas de ensayo	↑ la resistencia y el módulo de rigidez en tensión, ↓ la elongación al rompimiento	↑ la temperatura de fusión, ↓ la entalpia de fusión y la cristalinidad

	anhidrido maleico (5%)	anhidrido maleico			
<i>Totaro et al</i> [52]	Biopolímeros (PLA y PBS), piel plateada de café (10,20 y 30%)	Molienda en molino de bolas, secado a 60°C al vacío durante 12 horas para eliminar humedad de todos los materiales	Mezclador interno	↑ módulo de rigidez en tensión, ↓ la resistencia a la tensión y la elongación en el punto de rotura	↓ la temperatura de descomposición y la T _g , ↓ la temperatura de fusión para el PLA y ↔ para el PBS, ↑ la cristalinidad
<i>Gigante et al</i> [51]	Co-Biopolímero (PHBV), piel plateada de café (5,7,5,10 y 12.5), ATBC (plastificante), CaCO ₃ (ayudante de proceso)	Proceso de secado a 110°C por 24 horas	Extrusora doble husillo co-rotante, Inyección para producir capsulas de café	↑ módulo en tensión, ↓ la resistencia y la elongación en el punto de rotura	↓ la fluidez de los compuestos y la temperatura de cristalización, las temperaturas de fusión se mantienen y ↑ la cristalinidad

El café molido fue utilizado en la fabricación de películas biopoliméricas como un compuesto principal. Estas películas se pueden utilizar en viveros, canecas o cualquier uso que no requiera que el material sea decorativo. Inicialmente, se llevó a cabo el proceso de secado en un horno a una temperatura de 105°C por un período de 16 horas continuas. Se realizó un tratamiento alcalino con peróxido de hidrógeno con la finalidad de enriquecer el polisacárido del café molido. Al mezclar los compuestos y crear los prototipos, se realizaron distintos ensayos donde se concluye que las películas biopoliméricas creadas tienen una mayor resistencia a la tracción y permeabilidad del agua superiores a las películas convencionales. Finalmente, se puede asegurar que la película biopolimérica creada, es en su totalidad biodegradable debido a que en su fabricación no se utilizó ningún producto químico no degradable [53].

4. CONCLUSIONES

El aprovechamiento de los residuos provenientes de la agroindustria del café es una alternativa ecológica para la creación de productos y biomateriales compuestos. Cada uno de los residuos posee distintas propiedades, lo cual permite que estos puedan ser utilizados de distintas maneras. Los estudios que se han realizado para la elaboración de materiales compuestos de matriz polimérica empleando estos residuos han mostrado muy buenos resultados, permitiendo la incorporación de un alto rango de residuos, los cuales pueden oscilar entre 5% y 90%, dependiendo del tipo de residuo y de matriz.

Uno de los usos más atractivos para la utilización de los residuos del café, ha sido la incorporación de estos en matrices poliméricas de diferente naturaleza; esto se debe al auge que actualmente tienen estos materiales en muchos sectores, y adicionalmente a la gran problemática ambiental generada por la mala disposición de los residuos tanto agroindustriales como los provenientes del sector de los polímeros. A partir de los resultados del presente estudio, se establece que los materiales compuestos obtenidos mostraron mejoras en varias propiedades al adicionar residuos como la cascarilla del café y la piel plateada del café; algunas de las propiedades más importantes, y que vale la pena mencionar son la mejora en el rendimiento frente a

esfuerzos de tensión y de flexión; sin embargo, la resistencia al impacto y la elongación en rotura disminuyeron; resultados que permiten concluir que estos compuestos pueden ser empleados en productos que estén sometidos a cargas superiores que los polímeros sin reforzar, sin embargo se debe tener cuidado porque estos nuevos materiales presentarían menor ductilidad, lo que los limitaría para las aplicaciones donde las deformaciones y los impactos sean una característica técnica esencial de los productos.

Los compuestos poliméricos elaborados con los residuos provenientes de la agroindustria del café también presentan mejoras en propiedades térmicas; como por ejemplo en el aumento de la temperatura de suavizado Vicat y en las temperaturas de fusión, esto para la mayoría de polímeros evaluados; sin embargo es importante tener en cuenta que dependiendo de la matriz polimérica que se emplee para la elaboración del compuesto, estas propiedades pueden cambiar un poco, esto debido a que algunas matrices evaluadas con biopolímeros y en el caso específico, por ejemplo, del PLA, las temperaturas de fusión disminuyeron al adicionar la película plateada de café.

Finalmente se concluye que estos materiales pueden ser buenos candidatos para la generación de nuevos tipos de materiales, los cuales presentan un rendimiento técnico aceptable para muchas aplicaciones, y sobre todo, compuestos diseñados con la finalidad de contribuir a la sostenibilidad y a la conservación ambiental.

REFERENCIAS

- [1] M. Ilangoan, V. Guna, C. Hu, A. Takemura, Z. Leman, and N. Reddy, “Dehulled coffee husk-based biocomposites for green building materials,” *J. Thermoplast. Compos. Mater.*, 2019.
- [2] Q. Rizzuto and M. Liliana, “El mercado mundial del café: tendencias recientes, estructura y estrategias de competitividad,” *Visión Gerenc.*, no. 2, pp. 291–307, 2014.
- [3] K. Salazar Ospina, A. Arroyave, A. Ovalle Castiblanco, O. Ocampo, C. Augusto Ramírez, and C. Oliveros Tascón, “Tiempos en la recolección manual tradicional de café,” *Ing. Ind.*, vol. 37, no. 2, pp. 114–126, 2016.
- [4] J. J. Echavarría, P. Esguerra, D. McAllister, and C. F. Robayo, “Informe de la misión de estudios para la competitividad de la caficultura en Colombia. Resumen ejecutivo,” p. 122 Páginas, 2015.
- [5] FNC, “La Política Cafetera 2010-2014,” *Fed. Nac. Cafe. Colomb.*, vol. 30, pp. 1–25, 2014.
- [6] M. Kiuhan, F. Matíz, G. Pinzón, R. Rodríguez, and Á. Rojas, “El café de Colombia: Un modelo de diferenciación de producto, posicionamiento de marca y valor agregado,” *Rev. Esc. Adm. Negocios*, no. 56, pp. 34–53, 2006.
- [7] C. Felipe and O. Yacué, “El acompañamiento institucional en el desarrollo del sector cafetero colombiano,” *Financ. Econ. Policy*, vol. 7, no. 1, pp. 169–191, 2015.
- [8] J. J. C. Herrera, I. D. A. Torres, and C. E. O. Tascón, “Evaluación de Propiedades Físicas y Mecánicas del Fruto de Café (*Coffea Arabica* L. Var. Colombia) Durante Su Desarrollo y Maduración,” *DYNA*, vol. 79, no. 173 PART I, pp. 116–124, 2012.
- [9] O. L. Ocampo Lopez and L. M. Alvarez-Herrera, “Tendencia de la producción y el consumo del café en Colombia,” *Apunt. Del Cenes*, vol. 36, no. 64, 2017.
- [10] A.-M. Parente-Laverde, “Value Chain and Economic Development: the Case of the Colombian Coffee Industry,” *Organ. Mark. Emerg. Econ.*, vol. 11, no. 1, pp. 173–188, 2020.

- [11] R. G. García and E. S. Olaya-Escobar, "Caracterización de las cadenas de valor y abastecimiento del sector agroindustrial del café," *Cuad. Adm.*, vol. 19, no. 31, pp. 197–217, 2006.
- [12] R. H. Setyobudi et al., "Prospect of Fe non-heme on coffee flour made from solid coffee waste: Mini review," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 293, no. 1, 2019.
- [13] R. Rathinavelu and G. Graziosi, "Posibles usos alternativos de los residuos y subproductos del café," *Organ. Int. del Café*, no. 942, pp. 1–4, 2005.
- [14] L. Huang, B. Mu, X. Yi, S. Li, and Q. Wang, "Sustainable Use of Coffee Husks For Reinforcing Polyethylene Composites," *J. Polym. Environ.*, vol. 26, no. 1, pp. 48–58, 2018.
- [15] M. C. Echeverria and M. Nuti, "Valorisation of the Residues of Coffee Agro-industry: Perspectives and Limitations," *Open Waste Manag. J.*, vol. 10, no. 1, pp. 13–22, 2017.
- [16] A. S. Franca and L. S. Oliveira, *Coffee processing solid wastes: Current uses and future perspectives*, no. January. 2009.
- [17] G. Oduardo, B. Savón, R. Catalina, R. Pérez, A. Rodríguez, and I. Arelis, "Potencial biotecnológico de la pulpa de café para producir enzimas ligninolíticas por fcs," *Tecnol. Química*, vol. XXX, no. 2, pp. 102–107, 2010.
- [18] S. I. Mussatto, E. M. S. Machado, S. Martins, and J. A. Teixeira, "Production, Composition, and Application of Coffee and Its Industrial Residues," *Food Bioprocess Technol.*, vol. 4, no. 5, pp. 661–672, 2011.
- [19] T. Salinas-Rios et al., "Productive performance and oxidative status of sheep fed diets supplemented with coffee pulp," *Small Rumin. Res.*, vol. 123, no. 1, pp. 17–21, 2015.
- [20] S. Martínez, F. Hernández, C. Aguilar, and R. Rodríguez, "Extractos de pulpa de café: Una revisión sobre antioxidantes polifenólicos y su actividad antimicrobiana. Coffee pulp extracts: A review of polyphenolic antioxidants and their antimicrobial activity," *Food Chem.*, vol. 27, no. 77, pp. 73–79, 2019.
- [21] P. S. Murthy, M. Manjunatha, G. Sulochannama, and M. Madhava Naidu, "Extraction, Characterization and Bioactivity of Coffee Anthocyanins," *Eur. J. Biol. Sci.*, vol. 4, no. 1, pp. 13–19, 2012.
- [22] G. V. Valdés-hernández, L. Cruz-viera, and R. Comet-rodríguez, "Influencia de las condiciones de operación en la extracción de polifenoles a partir de hojas de Moringa oleifera Lam," *Rev. CENIC. Ciencias Químicas*, vol. 46, pp. 135–145, 2015.
- [23] J. A. Serna-Jiménez, L. S. Torres-Valenzuela, K. Martínez Cortínez, and M. C. Hernández Sandoval, "Aprovechamiento de la pulpa de café como alternativa de valorización de subproductos.," *Rev. ION*, vol. 31, no. 1, pp. 37–42, 2018.
- [24] K. Kante, C. Nieto-Delgado, J. R. Rangel-Mendez, and T. J. Bandosz, "Spent coffee-based activated carbon: Specific surface features and their importance for H₂S separation process," *J. Hazard. Mater.*, vol. 201–202, pp. 141–147, 2012.
- [25] C. H. Chiang, J. Chen, and J. H. Lin, "Preparation of pore-size tunable activated carbon derived from waste coffee grounds for high adsorption capacities of organic dyes," *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 8, no. 4, p. 103929, 2020.

- [26] J. L. De Oliveira, J. N. Da Silva, E. Graciosa Pereira, D. Oliveira Filho, and D. Rizzo Carvalho, "Characterization and mapping of waste from coffee and eucalyptus production in Brazil for thermochemical conversion of energy via gasification," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 21, pp. 52–58, 2013.
- [27] M. M. M. Chávez, W. Sarache, and Y. Costa, "Towards a comprehensive model of a biofuel supply chain optimization from coffee crop residues," *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.*, vol. 116, no. June, pp. 136–162, 2018.
- [28] J. Orosco, F. J. Patiño, M. J. Quintero, and L. Rodríguez, "Residual biomass gasification on a small scale and its thermal utilization for coffee drying," *Livest. Res. Rural Dev.*, vol. 30, no. 1, 2018.
- [29] N. Rodríguez Valencia and D. Zambrano Franco, "Los subproductos del café: fuente de energía renovable," *Av. Técnicos Cenicafé*, no. 3, p. 8, 2010.
- [30] W. Urrego Yepes, J. C. Posada, L. Y. Jaramillo, and J. D. Sierra, "Study of mechanical and physical properties of LLDPE-G-MA injection grade reinforced with coffee husk post-industrial waste," *J. Compos. Mater.*, vol. 51, no. 3, pp. 419–429, 2017.
- [31] E. Manals-Cutiño, D. Salas-Tort, and M. Penedo-Medina, "Caracterización de la biomasa vegetal cascarilla de café," *Tecnol. Química*, vol. 38, no. 1, pp. 169–181, 2018.
- [32] C. Buratti, E. Belloni, and F. Merli, "Water vapour permeability of innovative building materials from different waste," *Mater. Lett.*, vol. 265, p. 127459, 2020.
- [33] A. A. Ayalew and T. A. Aragaw, "Utilization of treated coffee husk as low-cost bio-sorbent for adsorption of methylene blue," *Adsorpt. Sci. Technol.*, vol. 38, no. 5–6, pp. 205–222, 2020.
- [34] D. R. Gusti, I. Lestari, E. Permana, and R. Anggraini, "Exploration of coffee bean husks waste as an eco-environmentally friendly corrosion inhibitor on mild steel in sulphuric acid solutions," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 483, no. 1, 2020.
- [35] A. Iriondo-Dehond, M. Iriondo-Dehond, and M. D. Del Castillo, "Applications of compounds from coffee processing by-products," *Biomolecules*, vol. 10, no. 9, pp. 1–20, 2020.
- [36] V. A. Yiga, S. Pagel, M. Lubwama, S. Epple, P. W. Olupot, and C. Bonten, "Development of fiber-reinforced polypropylene with NaOH pretreated rice and coffee husks as fillers: Mechanical and thermal properties," *J. Thermoplast. Compos. Mater.*, vol. 33, no. 9, pp. 1269–1291, 2020.
- [37] H. D. A. Leal, A. S. Babetto, and B. C. Bonse, "Properties of lignocellulosic composites of coffee husk filled polypropylene," *AIP Conf. Proc.*, vol. 2205, no. January, 2020.
- [38] A. Garavito Rozo and Gl. I. Puerta Quintero, "Utilización del mucílago de café en la alimentación de cerdos," *Av. Técnicos Cenicafé*, no. 248, pp. 1–12, 1998.
- [39] R. R. Pinto et al., "Sustitución de melaza por mucílago de café (*Coffea arabica* L.) en bloques nutricionales para rumiantes," *Arch. Zootec.*, vol. 63, no. 241, pp. 65–71, 2014.
- [40] K. Tatiana et al., "Potencial de biogás de los residuos agroindustriales generados en el departamento de Cundinamarca Biogas potential of agro-industrial residues generated in the department of Cundinamarca Potencial do biogás dos resíduos agro-industriais gerados no departa," *Rev. ION*, vol. 29, no. 2, pp. 23–37, 2016.

- [41] E. L. Moreno Cárdenas and A. D. Zapata Zapata, "Biohydrogen production by co-digestion of fruits and vegetable waste and coffee mucilage," *Rev. Fac. Nac. Agron. Medellin*, vol. 72, no. 3, pp. 9007–9018, 2019.
- [42] D. Orrego, A. D. Zapata-Zapata, and D. Kim, "Ethanol production from coffee mucilage fermentation by *S. cerevisiae* immobilized in calcium-alginate beads," *Bioresour. Technol. Reports*, vol. 3, no. July, pp. 200–204, 2018.
- [43] S. Skin, T. Klingel, J. I. Kremer, V. Gottstein, and T. R. De Rezende, "foods A Review of Coffee By-Products Including Leaf," 2020.
- [44] V. A. Mirón-Mérida, J. Yáñez-Fernández, B. Montañez-Barragán, and B. E. Barragán Huerta, "Valorization of coffee parchment waste (*Coffea arabica*) as a source of caffeine and phenolic compounds in antifungal gellan gum films," *Lwt*, vol. 101, no. October 2018, pp. 167–174, 2019.
- [45] S. P. Kusumocahyo, S. Wijaya, A. A. C. Dewi, D. Rahmawati, and D. I. Widiputri, "Optimization of the extraction process of coffee pulp as a source of antioxidant," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 443, no. 1, 2020.
- [46] N. Aguilar Rivera, E. Houbroun, E. Rustrian, and L. C. Reyes Alvarado, "Papel amate de pulpa de café (*Coffea arabica*) (residuo de beneficio húmedo)," *Ra Ximhai*, pp. 103–118, 2014.
- [47] L. Regazzoni et al., "Coffee silver skin as a source of polyphenols: High resolution mass spectrometric profiling of components and antioxidant activity," *J. Funct. Foods*, vol. 20, pp. 472–485, 2016.
- [48] Y. C. Chen and S. Y. Jhou, "Integrating spent coffee grounds and silver skin as biofuels using torrefaction," *Renew. Energy*, vol. 148, pp. 275–283, 2020.
- [49] F. Sarasini et al., "Recycling coffee silverskin in sustainable composites based on a poly(butylene adipate-co-terephthalate)/poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) matrix," *Ind. Crops Prod.*, vol. 118, no. March, pp. 311–320, 2018.
- [50] C. Aiello Mazzarri, Y. Salazar, A. Urribarrí, E. Arenas Dávila, J. Sánchez Fuentes, and F. Ysambertt, "Producción de biodiésel a partir de las grasas extraídas de la borra de café: esterificación con H₂SO₄ y transesterificación con KOH," *Cienc. e Ing. Neogranadina*, vol. 29, no. 1, pp. 53–66, 2019.
- [51] V. Gigante et al., "Utilization of coffee silverskin in the production of Poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) biopolymer-based thermoplastic biocomposites for food contact applications," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 140, no. October 2020, p. 106172, 2021.
- [52] G. Totaro, L. Sisti, M. Fiorini, I. Lancellotti, F. N. Andreola, and A. Saccani, "Formulation of Green Particulate Composites from PLA and PBS Matrix and Wastes Deriving from the Coffee Production," *J. Polym. Environ.*, vol. 27, no. 7, pp. 1488–1496, 2019.
- [53] M. J. P. A. Batista, A. F. Ávila, A. S. Franca, and L. S. Oliveira, "Polysaccharide-rich fraction of spent coffee grounds as promising biomaterial for films fabrication," *Carbohydr. Polym.*, vol. 233, no. September 2019, p. 115851, 2020.