

Systematic review of value-added recycling strategies in coffee processing

Diego Andre Guerrero Echave¹; Juanita Maria Vera Vilcherrez²; José Felix Pingo Lozada³; Ingrid Estefani Sánchez García⁴

¹Universidad Tecnológica del Perú, Perú, U20300513@utp.edu.pe, ²Universidad Tecnológica del Perú, Perú, U20301038@utp.edu.pe, ³Universidad Tecnológica del Perú, Perú, C28097@utp.edu.pe, ⁴Universidad Tecnológica del Perú, Perú, C25553@utp.edu.pe

Abstract- *The coffee industry generates high volumes of waste in its production operations; therefore, the circular economy represents a promising alternative for managing and adding value to the waste generated. The objective of this review is to identify value-added strategies (upcycling) used to reuse waste produced by the coffee industry. To this end, a descriptive method was used, the PICO strategy for article searches, and the PRISMA method for selection in indexed databases, resulting in 32 articles on various value-added strategies for certain waste products from coffee production. The findings of this research show that spent coffee grounds (SCG) are primarily reused for biofuel, activated carbon, construction components, and fertilizers; while coffee husks show potential for treating soil and water. Furthermore, roasting stands out for its effectiveness in producing energy derived from SCG, as does phosphoric acid to enhance carbon activation. It is possible to affirm that strategies for the value-added reuse of waste reduce negative impacts on the environment and provide valuable sustainable approaches for the coffee industry.*

Keywords-- Waste, resource valuation, waste treatment, coffee, environmental impact.

Revisión sistemática de las estrategias del reciclaje con valor agregado en el procesamiento del café

Diego Andre Guerrero Echave¹, Juanita Maria Vera Vilcherrez², José Felix Pingo Lozada³, Ingrid Estefani Sánchez

García⁴

¹Universidad Tecnológica del Perú, Perú, U20300513@utp.edu.pe, ²Universidad Tecnológica del Perú, Perú, U20301038@utp.edu.pe, ³Universidad Tecnológica del Perú, Perú, C28097@utp.edu.pe, ⁴Universidad Tecnológica del Perú, Perú, C25553@utp.edu.pe

Resumen– La industria cafetalera genera elevados volúmenes de desechos en sus operaciones productivas, a razón de esto, la economía circular constituye una prometedora alternativa para gestionar y aportar valor a los residuos que se originan. El objetivo de la presente revisión es identificar las estrategias de valor agregado (upcycling) que se aplican para reutilizar los desechos producidos por la industria del café. Para ello, se siguió un método descriptivo, la estrategia PICO para la búsqueda de artículos y el método PRISMA para la selección en bases de datos indexadas, resultando 32 artículos sobre diversas estrategias de valor agregado para determinados residuos provenientes de la producción de café. Los hallazgos de la presente investigación evidencian que los pozos de café usados o Spent Coffee Grounds (SCG) son reutilizados primordialmente para biocombustible, carbón activado, componentes de construcción y fertilizantes; mientras que, la cascarilla de café muestra potencial para tratar suelos y aguas. Además, la torrefacción destaca por su efectividad en producir energía derivada del SCG, al igual que el ácido fosfórico para potenciar la activación del carbón. Es posible afirmar que las estrategias para la reutilización con valor agregado de los residuos, disminuyen los efectos negativos en el medio ambiente y proporcionan enfoques sostenibles valiosos para la industria cafetalera.

Palabras clave– Desperdicio, valoración de recursos, tratamiento de desechos, café, Impacto medioambiental.

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente, en la ingesta de bebidas a nivel global destacan ciertos brebajes que se volvieron muy populares en el día a día como el té, el café, el mate, reconocidos por sus características y propiedades distintivas.

En el contexto mundial resalta la producción de café, por sus 2 grandes categorías: Arábica y Robusta. La producción de Arábica alrededor del mundo representa un 60%, y se extiende por Brasil, Colombia, Etiopía, Honduras y Perú; mientras que, la de Canephora (Robusta) es del 40% y sus mayores productores son Vietnam, Brasil, India, Uganda e Indonesia [1].

Según [2], durante las últimas dos décadas el sector del café ha experimentado un incremento del 65% en la demanda, debido a su amplio consumo en las economías en desarrollo y los países dedicados a la producción del café, así como a las innovaciones que han diversificado y facilitado su aprovechamiento.

Sobre la cadena de valor del café, [1] señala que es un producto muy diferenciado de otros productos básicos, puesto que no es suficiente con el envasado para proceder a la venta y posterior consumo, sino que conlleva a la ejecución de distintos métodos primarios de elaboración, que involucran la separación

de las capas externas de pulpa y piel de la cereza de café, al igual que el secado de los granos contenidos.

Si bien el café es producido en gran escala a nivel nacional e internacional, esta actividad genera altos índices de mermas, puesto que el 95% del peso de fruto representa los desperdicios, y solo el 5% restante es aprovechable en el proceso, tal cual lo menciona [3]. Este contexto no solo representa un peligro para el medio ambiente, sino también una pérdida de recursos que poseen el potencial de ser valiosos. El reciclaje con valor agregado, o upcycling, se muestra como una opción innovadora para convertir estos desperdicios en productos con un alto valor gracias a la sostenibilidad. No obstante, este tipo de reciclaje no ha sido lo suficientemente explorado ni implementado por la industria del café a nivel nacional.

Según Kwan [4], el upcycling es un término utilizado para referirse a otorgar un mayor valor a productos ya existente, así como una extensa apreciación del nuevo uso y el reciclaje de los elementos descartados, con la finalidad de convertirlos en bienes de mayor cuantía, en el ámbito de la calidad y sostenibilidad ambiental. A sabiendas de los posibles beneficios del upcycling, su viabilidad en el proceso productivo no ha sido muy estudiada, a comparación de otros productos.

La razón de esta revisión fue identificar las distintas estrategias de upcycling que se aplican para reutilizar los desechos producidos por la industria del café. Al buscar la respuesta en los distintos artículos, se encontró que, al implementar las prácticas del upcycling en la industria del café, no solamente se redujo la contaminación de la huella de carbono al medio ambiente, sino que generó nuevas oportunidades de negocio para los productores de café y las comunidades relacionadas.

Por ello, resulta necesario investigar la factibilidad y rentabilidad del upcycling en la industria del café, además de identificar los principales obstáculos que podrían surgir en su implementación.

II. METODOLOGÍA

A. Estrategia de búsqueda

Recientemente, ha tomado auge el interés por implementar prácticas más ambientales y sostenibles en las industrias, sobre todo en las que generan residuos en múltiples etapas de su proceso productivo, como la industria del café, la cual fue una condición que dirigió la presente revisión sistemática de literatura (RSL). Esta revisión tuvo como finalidad identificar las distintas estrategias de upcycling que se aplican para reutilizar los desechos producidos por la industria del café

La perspectiva del upcycling en la industria cafetalera demuestra la oportunidad de añadir valor a elementos considerados como descartables, en conjunto con la innovación necesaria de un commodity como el café. Para la presente investigación se dispuso de información sobre los tipos de desechos y su disposición en dicha industria, estrategias de upcycling que se vienen desarrollando y sus efectos.

Para la consecución del objetivo de investigación, se realizó una búsqueda minuciosa de información mediante bases de datos electrónicas y plataformas de búsqueda académicamente validadas, se empleó palabras clave y los criterios de exclusión e inclusión.

Con ello, se hizo uso de la estrategia de búsqueda PICO para la recopilación de información pertinente vinculada con el tema de la revisión. Esta estrategia considera la interrogante de revisión, así como las preguntas asociadas, definidas en función de los componentes PICO (Población o Problema, Intervención, Comparación y Resultados).

TABLA I. TABLA METODOLOGÍA PICO

P	I	C	O
Población	Intervención	Comparación	Resultados
Desechos del proceso productivo del café	Estrategias de reciclaje	Upcycling y métodos tradicionales de disposición de residuos	Impacto en el proceso productivo del café
¿Qué estrategias de valor agregado (upcycling) se aplican para reutilizar los desechos producidos por la industria del café?			
P1. ¿Qué tipo de desechos se generan en el proceso productivo del café?			
P2. ¿Qué estrategias de reciclaje con valor agregado se vienen desarrollando en el proceso productivo del café?			
P3. ¿Cuáles son las diferencias entre las estrategias de upcycling en el proceso productivo del café y los métodos tradicionales de disposición de residuos?			
P4. ¿Cómo afectan las estrategias de reciclaje con valor agregado al proceso productivo del café?			

Fuente: Elaboración Propia, 2024

B. Ecuaciones de búsqueda

Para la búsqueda de la información en la RSL, se recurrió a 4 bases de datos, las cuales resaltan por el alcance internacional, la diversidad y calidad de sus contenidos. Las cuales fueron: Scielo, EBSCOhost, Redalyc y Scopus. Con estas bases de datos y el uso de palabras clave permitió realizar una búsqueda más efectiva, identificando estudios relevantes sobre las diferentes estrategias de upcycling de los desechos en el proceso productivo del café.

TABLA II. ECUACIÓN DE BÚSQUEDA

Componente PICO	Términos	Ecuación de búsqueda
P	Población	wastes OR residues OR scraps OR rest
	Desechos, residuos, desperdicios, restos	

I	Intervención	Reciclaje de valor agregado, aprovechamiento de residuos, revalorización de desechos, transformación de residuos	upcycling OR "use of residues" OR revaluation OR transformation
C	Comparación	Disposición de residuos, gestión de residuos, manejo de residuos, tratamiento de residuos	disposal OR management OR handling OR treatment
O	Resultados	Impacto, efecto, repercusión, consecuencia	impact OR effect OR repercussion OR consequence
Ecuación general de búsqueda			
TITLE – ABS – KEY (wastes OR residues OR scraps OR rest) AND (upcycling OR "use of residues" OR revaluation OR transformation) AND (disposal OR management OR handling OR treatment) AND (impact OR effect OR repercussion OR consequence) AND (coffee)			

Fuente: Elaboración Propia, 2024

C. Criterios de Inclusión y Exclusión

Al elegir la literatura que tenga las características aptas, se eliminan los estudios que no contribuyan con información significativa, se definieron los criterios de inclusión y exclusión. Los cuales son:

TABLA III. CRITERIOS (INCLUSIÓN Y EXCLUSIÓN)

CI	CE
CI1: Documentos que carecen de restricciones de acceso.	CE1: Publicaciones con períodos que no oscilan entre 2019 y 2024.
CI2: Estudios que aborden aspectos referentes a la merma que ocasiona el proceso productivo del café.	CE2: Investigaciones o estudios que no evidencien un enfoque científico.
CI3: Publicaciones que describan métodos/estrategias de reutilización de residuos del proceso productivo del café.	CE3: Investigaciones que traten el tema de los residuos del café o el reciclaje de los mismos desde un campo psicológico, social, histórico y similares.
CI4: Estudios que reporten resultados indicando que el método/estrategia a utilizar es viable en cuanto a la sostenibilidad.	CE4: Publicaciones que se especialicen en tratar aspectos que no mantengan relación con los desechos del proceso productivo del café, así como de los métodos de reciclaje de los mismos,

Fuente: Elaboración Propia, 2024

D. Proceso de Selección de estudios

En el proceso de la selección de las investigaciones, se aplica el método PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) como lo indica [5] la Guía PRISMA 2020 tiene sugerencias sobre cómo realizar la identificación, selección, evaluación y sintetización de estudios, logrando una mejora en la calidad y la fiabilidad de las revisiones ya que, en esta versión se encuentran los últimos avances de los métodos de revisión. La Guía PRISMA 2020 es

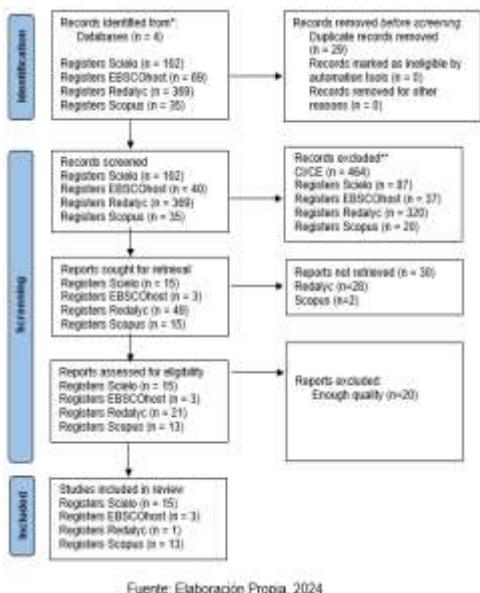
primordial, pues brinda un marco estandar que asegura un formato coherente y transparente, como lo refiere [6].

Para recopilar información clave acerca de las estrategias de upcycling de desechos del proceso productivo del café, la revisión sistemática y el enfoque PRISMA son herramientas fundamentales al momento de estructurar y ejecutar revisiones.

Para comenzar el proceso de revisión, se valoraron varios componentes del enfoque PRISMA, iniciando con la selección de los criterios, las bases de datos, la estrategia de búsqueda, y el proceso para la selección final de los estudios. En este sentido se usaron las bases de datos electrónicas, tales como: Scielo, EBSCOhost, Redalyc y Scopus. Además, se aplicó la ecuación de búsqueda con los términos: wastes, residues, scraps, rest, upcycling, "use of residues", revaluation, transformation, disposal, management, handling, treatment, impact, effect, repercussion, consequence.

Los términos se restringen desde el año 2019 al 2024. De inicio, se ejecutó la ecuación de búsqueda con 575 artículos: Scielo (n = 102), EBSCOhost (n = 69), Redalyc (n = 369), Scopus (n = 35). De estos, se verificó la existencia de duplicados (29), los cuales se eliminaron. Luego, se aplicaron los criterios, en donde se descartaron 464 artículos, debido a que no se relacionaban con el tema de investigación, no eran de acceso abierto y no permitían el logro del objetivo. Luego, se separaron 30, ya que no era posible su recuperación en la web. Por último, se apartaron 20 artículos dado que, se encontró que carecían de calidad para la revisión sistemática. Quedando un total de 32 artículos disponibles para la presente RSL.

FIGURA 01. FLUJO DEL PRISMA



III. RESULTADOS

La información fue evaluada tomando en cuenta dos enfoques: bibliométrico y de contenido. La evaluación bibliométrica aportó una visión general de las investigaciones,

mientras que la evaluación de contenido permitió indagar a profundidad aspectos detallados del tema investigado.

A. Resultados bibliométricos

Al comienzo del estudio, se efectuó una evaluación bibliométrica de cada investigación considerada en la RSL. En la Tabla IV se muestra un resumen de los datos compilados, el cual incluye los nombres de los autores, el título de los artículos y el año de publicación de cada uno.

TABLA IV.
LISTADO DE ARTÍCULOS SELECCIONADOS
EN EL PERÍODO 2019-2024.

Autor (es)	Título del artículo
Remón et al. (2021)	"Caffeinating the biofuels market: Effect of the processing conditions during the production of biofuels and high-value chemicals by hydrothermal treatment of residual coffee pulp"
Nepal et al. (2022)	"A study on torrefaction of spent coffee ground to improve its fuel properties"
Hou et al. (2023)	"Role of Maillard reactions in co-pyrolysis of lignite and spent coffee grounds: Fixation of nitrogen in semicoke and improved adsorption of phenols"
San Martin et al. (2023)	"Evaluation of Valorisation Strategies to Improve Spent Coffee Grounds' Nutritional Value as an Ingredient for Ruminants' Diets"
Zhao et al. (2024)	"Spent coffee grounds: Present and future of environmentally friendly applications on industries-A review"
González et al. (2022)	"Improvement and Use of Effluents for the Benefit of Coffee"
Pettinato et al. (2023)	"A Biorefinery from Spent Coffee Grounds: from High-added Value Compounds to Energy by Innovative Processes"
Lombardo et al. (2024)	"A Biorefinery from Spent Coffee Grounds: from High-added Value Compounds to Energy by Innovative Processes"
Bianchi et al. (2024)	"Valorización de la piel plateada del café mediante la extracción en cascada de biomoléculas valiosas: preparación de compuestos ecológicos como paso final"
Smitirupa et al. (2023)	"Comportamiento de reducción de pellets compuestos de hematita y biorresiduos a temperatura de fusión"
Pérez et al. (2023)	"Pulpa de café: una fuente sostenible y asequible para el desarrollo de alimentos funcionales"
Saeli et al. (2023)	"La cafetería: reciclaje de posos de café usados para la producción de productos arquitectónicos geopoliméricos verdes que ahorran energía"
Kougioumtzis et al. (2024)	"Valorización del café molido usado mezclándolo con varios tipos de biomasa residual para la producción de pellets: evaluación de las propiedades de los biocombustibles sólidos en diferentes mezclas"
Capuano et al. (2024)	"Reciclaje de la piel de plata del café en recubrimientos funcionales de base biológica"
Ríos et al. (2024)	"Obtaining coffee mucilage micro capsules by spray drying using chemically modified banana starch"
Kasbaji et al. (2023)	"Adsorption of cationic and anionic dyes onto coffee grounds cellulose/sodium alginate double-network hydrogel beads: Isotherm analysis and recyclability performance"
Liu et al. (2021)	"Biotransformation of spent coffee grounds by fermentation with monocultures of <i>Saccharomyces cerevisiae</i> and <i>Lachancea thermotolerans</i> aided by yeast extracts"
De Freitas et al. (2023)	"EXPLORING SPENT COFFEE GROUNDS ENERGY POTENTIAL IN THE BRAZILIAN SCENARIO"
Castro et al. (2023)	"Development of Adsorbent Materials Using Residue from Coffee Industry and Application in Food dye Adsorption Processes"
Garibaldi et al. (2022)	"CO-DIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS SÓLIDOS DEL BENEFICIO DEL CAFÉ, PSEUDOTALLO DE PLÁTANO Y EXCRETA PORCINA: CRITERIOS CINÉTICOS, ENERGÉTICOS Y AMBIENTALES"
Carnier et al. (2022)	"Cadmium and lead adsorption and desorption by coffee waste-derived biochars"
Oh, Yong-Sung. (2021)	"Evaluation of chestnut shell and coffee waste with phenol-formaldehyde resin for plywood filler"

Souza et al. (2021)	"Kinetic Study of a Bacterial Cellulose Production by Komagataeibacter Rhaeticus Using Coffee Grounds and Sugarcane Molasses"
Costa et al. (2020)	"Optimization of Espresso Spent Ground Coffee Waste Extract Preparation and the Influence of its Chemical Composition as an Eco-friendly Corrosion Inhibitor for Carbon Steel in Acid Medium"
Chávez et al. (2019)	"Landfill leachate treatment using activated carbon obtained from coffee waste"
Aranguri et al. (2019)	"Adsorción del cianuro contenido en solución acuosa usando carbón activo obtenido de residuo de café: eficiencia de absorción, modelado de equilibrio y cinética"
Gazonato et al. (2019)	"Thermo mechanical Properties of Corn Starch Based Film Reinforced with Coffee Ground Waste as Renewable Resource"
Barbosa et al. (2024)	"Development and evaluation of slow-release organo-mineral phosphate fertilizer based on coffee waste slow-release slow-release"
Cunha et al. (2021)	"Biochar and swine wastewater: Effects on soil fertility of different textures and corn nutrition"
Nieto et al. (2021)	"Evaluación del cultivo del hongo Pleurotus Ostreatus y de su composición nutricional en Borra de Café"
Silva et al. (2021)	"Coffee waste as an eco-friendly and low-cost alternative for biochar production impacts on sandy soil chemical attributes and microbial gene abundance"
Martins et al. (2021)	"Impact of coffee biochar on carbon, microbial biomass and enzyme activities of a sandy soil cultivated with bean"
Bozzola et al. (2021)	"La Guía del Café Cuarta edición."
(N.d.) (2022)	"The value of coffee: Sustainability, Inclusiveness, and Resilience of the Coffee Global Value Chain"
Llorente. (2023)	"El Upcycling y su modelo de negocio"
Fernandez et al. (2020)	"Impactos ambientales de la producción del café, y el aprovechamiento sustentable de los residuos generados"
Page et al. (2021)	"The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews"
Sanchez et al. (2022)	"¿Cómo hacer una revisión sistemática siguiendo el protocolo PRISMA? Usos y estrategias fundamentales para su aplicación en el ámbito educativo a través de un caso práctico"

Para mejorar la lectura de los artículos seleccionados, se realizó una segmentación de los 32 artículos, que contribuyó a determinar información relevante para la investigación, como el uso de los residuos, idioma, país y año de publicación

Con este gráfico se infiere que en las bases de datos como Scielo y Scopus se puede encontrar más información sobre la reutilización de los subproductos generados en el proceso productivo del café.

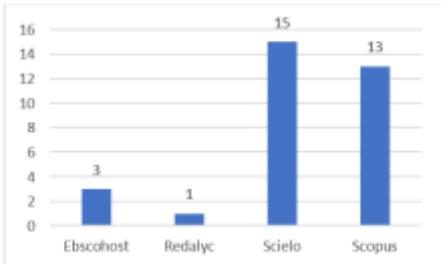


Gráfico I. Bases de datos utilizadas para la recopilación de artículos para la Revisión Sistemática.

En el siguiente gráfico se evidenció que a raíz de la pandemia del Covid-19 no se realizaron muchas investigaciones; no obstante, desde el 2023 se elaboraron más publicaciones de esta índole.

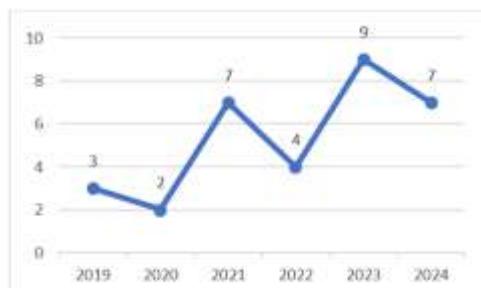


Gráfico II. Artículos empleados en la presente Revisión, clasificados según su año de publicación.

Como se evidencia en el gráfico 3, se resalta que la tercera parte del total de artículos son elaborados en Brasil, siendo este el mayor productor de café a nivel mundial y en donde más se incide en este tipo de investigación.

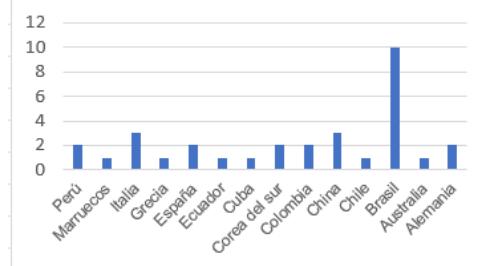


Gráfico III. Número de artículos usados en la Revisión acorde a su país de origen.

Este gráfico indica que hay mayor acceso y visibilidad sobre las investigaciones en inglés por encima de otro idioma.



Gráfico IV. Número de artículos empleados en la Revisión Sistemática según su idioma de publicación.

Con los resultados obtenidos en el Gráfico 5, se deduce que está aumentando el uso de los residuos del café en productos de carácter sostenible.

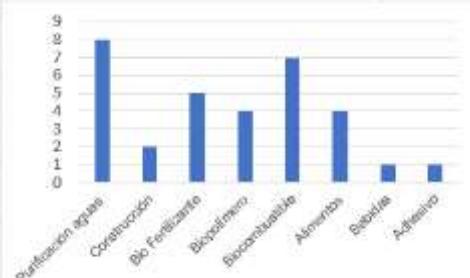


Gráfico V. N° de productos sostenibles creados con desechos del procesamiento del café.

B. Resultados por contenido

En la presente sección se explica los resultados de la lectura crítica, análisis y evaluación de los artículos sobre estrategias de upcycling en el proceso productivo del café. Por ello, se usó la información que ayuda a responder las preguntas de investigación mediante formularios para la extracción de datos.

P1: ¿Qué tipo de desechos se generan en el proceso productivo del café?

La producción y el consumo del café a nivel mundial genera una gran cuantía de residuos. Con respecto a esta industria y sus altos niveles de producción anuales, se estima que, por cada 1 tn de grano de café procesado, se generan aproximadamente 1,1 tn de residuos [7], así como 30 millones de tn anuales de desechos sólidos, altos niveles de volumen e importancia [8], [9]; de la misma forma, las cantidades del residuo agrícola del procesamiento del café, oscila de 30% a 50% del total de café producido en peso [10].

Entre uno de los principales residuos se encuentra a los SCG los cuales alcanzan los 6 millones de tn/año a nivel mundial [9], [11]. Por lo general, los SCG se generan en el consumo del café y de las industrias que producen café soluble (representan cerca del 50% de la industria del café) luego de elaborado los procesos de tostado, molienda y extracción de los saborizantes; los SCG también reciben la denominación de café molido, lodo de café molido, posos de café o borra de café [10], [12], [13], [14].

En el caso de Perú, se registra una producción de café de 4280 tn, de las cuales 2782 tn representa la generación de residuos de SCG; con lo que respecta a la producción de Brasil, considerado un destacado productor mundial de café soluble, presenta 480 kg de lodo de café molido por la producción de 1 tn de café; el SCG, es un residuo con una composición muy variada y heterogénea que abarca características lignocelulosas, hemicelulosas, cafeína, aceites, proteínas, entre otras [9], [15].

Otros subproductos relevantes de este proceso son la cáscara, cascarilla y la pulpa de café. Se genera alrededor de 180 Kg de cáscara por 1000 Kg de café procesado [7], [16]. De igual forma, durante el proceso de beneficio del café, el cual consiste en la extracción de los granos de café, el peso total de la cereza que se convierte en residuos sólidos como la cáscara, la pulpa y el pergamino, es del 80% y el 90% [17]. Además, otro desecho que resulta del procesamiento del grano de café de tipo conilón es la paja de café, la cual requiere de un cuidadoso manejo a fin de no generar efectos negativos para la salud ambiental y humana [18].

En el procesamiento seco de los granos de café, se desprende un material sólido denominado Cascarilla Plateada de Café o Coffee Silver Skin (CSS) del café que es producto residual cuando se tuestan los granos de café, la pulpa (producida en el despulpado del café), el mucílago tiene origen en la fermentación del café y estos se lavan desprendiendo dicho subproducto y el pergamino se obtiene al retirar una capa delgada exterior del grano de café seco. En cambio, en el proceso húmedo se emplean elevadas cantidades de agua,

ocasionando aguas residuales en el lavado del café, y se liberan 3 residuos sólidos como la pulpa de café (incluida parte de la piel), la cual se genera en la operación del despulpado, cuando se separa la pulpa del grano de café, junto con el mucílago y el pergamino, los cuales se producen en proporciones menores, y son desechos de la fermentación y del desprendimiento de una capa que recubre al grano de café seco respectivamente [19], [20].

En la Tabla V, se presenta el resumen de los tipos de residuos obtenidos del café, así como la descripción y su cantidad producida.

TABLA V. DESECHOS GENERADOS EN EL PROCESO PRODUCTIVO DEL CAFÉ

Residuos	Porción	Descripción	Fuente
SCG: posos de café usado, lodo de café, borra de café	6 millones ton/año	Restos de café tras el consumo y procesos industriales de café soluble.	[7], [9] , [10], [11], [13], [14], [15], [16], [21], [22], [23]
Cáscara	0.18% tn/ café procesad o	Subproducto del procesamiento, generado al extraer los granos de café.	[7], [9], [16], [17], [20], [22], [23].
Pulpa	80%-90% del peso total de café	Residuo sólido generado en el beneficio del café, al extraer los granos de la cereza de café.	[17], [18].
Mucílago		Residuo gelatinoso adherido al grano de café, retirado en el proceso de beneficio húmedo del café.	[17]
Pergamino		Capa que recubre al grano de café, eliminada en el beneficio antes del tostado.	[17]
Paja de café	No indica	Residuo del café tipo conilón, requiere manejo cuidadoso para evitar impactos ambientales y de salud.	[18]

P2: ¿Qué estrategias de reciclaje con valor agregado se vienen desarrollando en el proceso productivo del café?

En el proceso productivo del café se generan múltiples residuos, entre los más abundantes se tienen a los SCG, que es un residuo húmedo que se genera en el filtrado del café procesado, que equivale al 45 % del peso total de los granos de café [24] y a la CSS que es una capa que se encuentra pegada a los granos de café y se origina en el proceso del tostado del café, se estima que anualmente se producen 400 mil toneladas de CSS por dicha industria [25]. Los cuales no son aprovechados por los productores, ocasionando daños perjudiciales al medio ambiente. No obstante, en recientes investigaciones se les están dando un sostenible, los cuales se comentarán a continuación.

El SCG, es un desecho que se emplea para producir biocombustibles como el biocrudo (líquido) e hidrocarbón (sólido) [19]. Este biocombustible se puede producir por medio del proceso de la torrefacción, en donde la biomasa se deshidrata, desvolatiliza, despolimeriza y carboniza con el fin de aumentar su nivel energético y vida útil [26]. En cambio, por el método de hidrólisis enzimática, con los azúcares del SGC, se puede obtener el bio etanol [27]. En el gráfico 6 se presenta

las eficiencias de los métodos principales para la obtención de energía con biomasa.

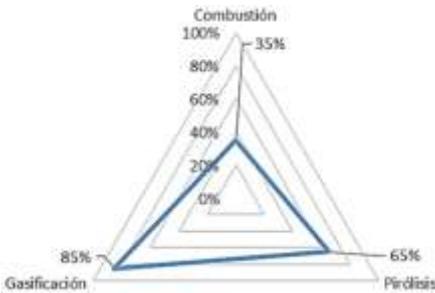


Gráfico VI. Porcentaje de eficiencia de los principales métodos para la obtención de energía de biomasa.

En cuanto al potencial energético del SCG, se evidenció que se considera una materia prometedora para la producción de energía, ya que cuenta con los siguientes niveles de: carbono al 50%, hidrógeno en un 7% (en peso), cuantías de ceniza 2%. Además, estudios previos evaluaron el potencial energético del SCG, sin considerar algún ciclo termodinámico o los métodos de transformación de biomasa, estimándose un valor promedio de poder calorífico de $23,35 \pm 2.56$ MJ/Kg (indicador de eficiencia energética del combustible), del cual se estimó un potencial de energía para Brasil del 6,83 TW (h/año) [11].

Otra manera de producir energía renovable es a partir de los pellets, que normalmente están elaborados de hierro y carbono, pero en este caso se cambia el carbono por los SCG, convirtiéndolo en un generador de energía con menos emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) [28]. Otra variante de los pellets es la combinación de los SCG entre un 10% y 30% con los residuos de la industria maderera entre un 90% y 70% y en una tercera opción se pueden usar las podas urbanas, pero con un 10% de SCG [29]. Al pasar el SCG por el proceso de co-pirólisis con lignito, se genera un incremento en la absorción de fenoles y otras moléculas orgánicas, mejorando la purificación de agua y enmienda de suelos [20], [30].

Otra estrategia es la digestión anaeróbica para el tratamiento y aprovechamiento de residuos, para mejorar la producción de metano, su potencial energético y la reducción de emisiones. En el proceso de descomposición biológica, en ausencia de oxígeno, los residuos sólidos de café obtenían mejores resultados cuando eran combinados con otros cosustratos como: estiércol del cerdo y pseudotallo de banano [17].

Por otro lado, el SCG se puede utilizar como un alimento para los rumiantes, pues al pasarlo por un tratamiento térmico y un mecanismo combinado con hidrólisis enzimática, se realiza una mejora nutricional al momento de ser digerido [20], [31]. Además, se puede usar en la elaboración de una barra energética, en donde se combina con jarabe de panela y cereales otorgándole un gran valor energético al snack [32]. Incluso, se puede crear cerveza con el SCG, en donde se le agrega cepas de levaduras en la fermentación de la hidrólisis, disminuyendo su tiempo de fermentación y mejorando su olor [33].

Otro uso que se le están dando a los SCG es en el ámbito de la construcción, en la producción de termoplásticos

ecológicos y sostenibles, ya que sustituyen materiales reduciendo el uso de energía de la edificación, al mismo tiempo que es una buena opción que disminuye el impacto ambiental y los costos [34], [35]. Inclusive, en el sector farmacéutico y cosmético los SCG poseen habilidades antioxidantes, antiinflamatorias, de protección contra los rayos solares, que se pueden emplear como una opción eco amigable, segura y económica en la fabricación de fármacos [24]. También se usa para la protección de estructuras metálicas, hay estudios que evidencian que los SCG tienen propiedades inhibidoras de corrosión ecológico en el acero al carbono, debido a la composición fenólica de los extractos, los cuales disminuyen la corrosión en ambientes ácidos [21]. Otro uso en este sector es en combinación con resina fenol-formaldehído (PF) como material aplicado en el relleno en adhesivos para madera contrachapada, pues en evaluaciones estructurales de contrachapados de la mezcla SCG + PF, se corroboró su efectividad cumpliendo con los estándares de resistencia mecánica y física exigidos; es así como se categoriza como una alternativa sustentable en la industria de paneles de madera [12].

De la misma forma, se demostró que el uso de SCG con melaza de caña de azúcar y etanol, favorece el crecimiento de la bacteria *Komagataeibacter rhaeticus*, mejorando la producción de celulosa bacteriana e incentivando el enfoque de economía circular en la biotecnología, debido a la optimización de residuos orgánicos. Igualmente, se presentó el SCG como agente de refuerzo para los polímeros a base de almidón de maíz, contribuyendo en mejoras térmicas y mecánicas del material, alineándose a la economía circular [15].

Los SCG se puede emplear en el tratamiento de aguas residuales, desde la depuración de lixiviados de vertedero, hasta la adsorción de cianuro en soluciones acuosas. En ambos casos se evaluó la conversión de los SCG en carbón activado y el aprovechamiento de las estructuras porosas y características de adsorción, el primero destacó el potencial adsorbente de la estructura porosa cuando se hace uso del ácido fosfórico para la activación; mientras que, el segundo caso resalta la obtención de altas eficiencias del carbón activado con ácido fosfórico, acompañado con condiciones de pH óptimas [8], [10]. De igual manera, la literatura presentó el uso de CSS y su conversión como carbón activado, destacando altas eficiencias con ácido fosfórico, obteniendo propiedades altamente porosas y de gran área superficial [16], también en la creación de biopolímeros, con un bajo impacto ambiental y económico, mejorando las prácticas en la industria del embalaje [13], [36].

A continuación, se presenta un cuadro comparativo de eficiencias de los tres estudios en mención:

TABLA VI.
COMPARACIÓN DE ESTUDIOS RELACIONADOS CON LOS SCG Y SU CONVERSIÓN EN CARBÓN ACTIVADO

Contaminante	Condiciones Óptimas (pH, Tiempo, Dosis)	Eficiencia de Adsorción (%)	Modelo de Isoterma de Adsorción

Amoniaco , Cobre, Cloro, Bromo, DQO [8]	PH no ajustado 150rpm, 120 min [8]	Amoniaco: 46.9%, Cobre: 97.5%, Cloro: 66.2%, Bromo: 81%, DQO: 51.3% [8]	Freundlich [8]
Cianuro [10]	Ph 8, 210 min, 46.82 g/L [10]	67.65% [10]	Freundlich [10]
Ponceau 4R [16]	pH 5.6, 90 min, 2 g/L [16]	Eficiencia máxima de 19.87 mg/g (en condiciones optimizadas) [16]	Langmuir ($R^2 = 0.84$) [16]

En cuanto a investigaciones sobre el área agrícola, se presentó una diversa cantidad de artículos que mencionaban aplicaciones tanto del SCG, como del CSS, y el pergamino. En un estudio se evidenció que, mediante una comparativa del carbón elaborado desde la CSS, y los SCG, los primeros obtuvieron mejores resultados en suelos arenosos, permitiendo el aumento de la calidad del suelo, mejorando los nutrientes y la biomasa microbiana del suelo; de la misma forma, otro estudio reitera los beneficios del biocarbón de CSS para mejorar la calidad de los suelos arenosos, mediante el incremento de Ca, K y pH, favoreciendo a la reducción de elementos tóxicos como las altas concentraciones de P (lábil) y aluminio [22], [23]. Análogamente, se hizo una comparación entre el biocarbón de SCG y el de pergamino de café, en donde el segundo tuvo mayor efectividad para atrapar plomo (Pb). Además, estudios revelaron la utilización de la paja de café conillón para hacer biocarbón con agua residual porcina, siendo útil para el aumento de P y K en su mayoría en la parte superior o aérea del maíz, y al mezclarse con agua residual porcina, mejora la fertilidad del suelo [7], [18].

Se encontró evidencia de que el SCG se usa para la elaboración de pellets de fertilizante organomineral con liberación lenta de fósforo de forma controlada, optimizando la absorción de nutrientes por las plantas. De igual forma sucedió con estudios del cultivo de hongo Pleurotus ostreatus, la seta de ostra concluyó el periodo de análisis con mayores valores proteicos, saludables y nutritivos [9], [14].

P3: ¿Cuáles son las diferencias entre las estrategias de upcycling en el proceso productivo del café y los métodos tradicionales de disposición de residuos?

Cerca del 97% de los SCG son dispuestos en vertederos para su eliminación, acción que aumenta las posibilidades que se produzcan emisiones de metano y otros gases [11], [16], [18], [19].

Al no darle un segundo uso al SCG, se elimina en la quema, generando incendios forestales y gases como el metano y el dióxido de carbono, los cuales afectan directamente a la capa de ozono, debilitándola con estas emisiones tóxicas [11], [30], [37].

Sin embargo, al emplear materiales residuales como materia prima o insumos para la elaboración de un producto ecológico [38], le otorga conciencia ambiental y sostenibilidad en las actividades del sector [28]. En la construcción, se

fabrican ladrillos con estos insumos, al usar dicha técnica, las empresas se vuelven más competitivos en su mercado [34].

Para la purificación de aguas residuales, se puede utilizar el carbón activado, creado a base de SCG o CSS, el cual destaca por sus bajos costos y capacidad de reutilización [8]. Sigue lo mismo en el caso de los fertilizantes organominerales (OMF), mejoran la calidad del aire, agua, contenido de materia orgánica propia del suelo, altos niveles de eficiencia, entre otros beneficios [14].

Finalmente, se compara la biomasa en su forma cruda, sin tratamiento, con el biocarbón resultante de la pirolisis, concluyendo que el segundo posee una estructura aromática y estable de carbono, lo cual mejora la retención de nutrientes en el suelo, ofreciendo beneficios prolongados al cultivo; mientras que, la biomasa sin tratamiento, brinda nutrientes limitados y menos duradera [18].

P4: ¿Cómo afectan las estrategias de reciclaje con valor agregado al proceso productivo del café?

Las estrategias de upcycling que se van a usar para los residuos del procesamiento del café reducen los problemas ambientales ligados a su creación. Sin embargo, el SCG posee elevados niveles de materia orgánica que puede ocasionar un exceso de nutrientes en cuerpos de agua, cuando no es eliminado bien. Al aplicar la estrategia que transforma el desecho en biocombustible, se previene la contaminación del suelo y agua, reduciendo las emisiones GEI, al mismo tiempo que se atenua la huella de carbono del café, estimado entre 0.27 kg y 0.70 Kg de CO₂/L de café. Además, el uso del SCG en la matriz energética del proceso disminuye el consumo de combustibles fósiles, diversificando las fuentes de energía. De esta forma se posicionó esta estrategia como clave para la sostenibilidad en la industria del café [8], [11].

Lo mismo ocurrió con la estrategia de carbón activado a base de CSS y SCG con ácido fosfórico, el cual es amigable con el medio ambiente [16]. En suma, se indicó que la elaboración de biocarbón es un destino ecológico para las materias resultantes del proceso del café, cooperando al desarrollo de una economía circular [7]. De igual forma sucede con la fabricación de biopolímeros, que reduce los niveles de contaminación ambiental, incentivando alternativas novedosas que permitan explotar el alto contenido orgánico de los desechos del café [13].

Por ello, con estas estrategias reducen los costos de la disposición de los desechos, permitiendo su reutilización [8]. Además, es posible mejorar los suelos con estas nuevas opciones, teniendo como consecuencia, una mayor productividad industrial [14]. El uso de elementos como biocarbón en los suelos, es una opción económica para los productores, reduciendo la necesidad y dependencia de los fertilizantes químicos [22].

IV. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en la presente RSL demuestran que la industria del café afronta desafíos cruciales en la emisión de grandes volúmenes de residuos como SCG, CSS, mucílago,

pergamino y la paja de café. Estos residuos por lo general, presentan una ineficiente disposición tradicional, ya sea mediante vertido directo, como abono sin tratar, y combustión, procedimientos que impactan negativamente en el medio ambiente, a través de la emisión de gases perjudiciales, la contaminación del agua y suelo [11], [16], [18], [19], [25], [30].

Frente a ello y de forma opuesta, se encuentran las estrategias de valor agregado, también conocidas como upcycling, las cuales han evidenciado ser alternativas para sostenibles e innovadoras. Por su lado, los SCG adquieren relevancia por ser el residuo más utilizado por su disponibilidad (6 Mtn./año), acompañada de su composición química ventajosa ($C > 50\%$, $H \approx 7\%$, cenizas $\approx 2\%$) en la obtención de energía, productos ecológicos y con valor económico [7], [11]. Siguiendo la misma línea, en virtud sus características para potenciar la densidad energética y la vida útil, la torrefacción ha sido catalogada como la técnica más óptima para la generación de combustibles sólidos [26].

De la misma forma, las investigaciones sobre la utilización de SCG y CSS para la fabricación de carbón activado, sostienen que la activación mediante ácido fosfórico dota de estructuras con un alto nivel de porosidad, adsorción y eficiencia de contaminantes (colorantes y metales pesados como el cianuro y amoníaco) [8], [10], [16], [27]. Asimismo, estudios relacionados resaltan las capacidades de los SCG y CSS en la reutilización para el tratamiento de suelos agrícolas (particularmente arenosos), produciendo biocarbón al elevar indicadores de pH, Ca, K, disminución de sustancias tóxicas [19], [31], [22], [23].

Por otra parte, se reconocieron crecientes tecnologías para la producción de biopolímeros para embalaje a base de CSS [36], termoplásticos aplicados en edificaciones [34], [35], y la formulación de fertilizantes organominerales de liberación lenta elaborados con SCG [14], [24]. Mencionadas estrategias tecnificadas aportan significativamente en la disminución del impacto ambiental negativo, en la diversificación de soluciones innovadoras y rentables con potencial de expansión.

Por último, la incorporación del upcycling como parte de los modelos de la economía circular se justifica por los cuantiosos beneficios económicos y ambientales que representa. Sin embargo, su implementación a gran escala demanda superar desafíos relacionados con la estandarización, regulaciones e inversión. La integración planificada de estas estrategias en la red de valor de la industria cafetalera, representa una gran oportunidad para revalorizar sus residuos, consolidándose como referentes en innovación y sostenibilidad.

V. CONCLUSIONES

En definitiva, los principales residuos que se generan a causa de los procesos de producción involucrados en la industria cafetalera, son los SCG y la CSS (en un 48% y 18% respectivamente, por Ton de café transformado). Es por ello que, en las investigaciones utilizadas para la presente RSL se

evaluaron diversas formas de reutilizar mencionados residuos en la elaboración de productos o soluciones funcionales. De las cuales resaltan los biocombustibles obtenidos mediante torrefacción, la forma más óptima en donde los SCG se someten a temperaturas ideales de 290°C y por un periodo de 10 min; también existen otros métodos de obtención con sus respectivos porcentajes de eficiencia: combustión (30%), pirolisis (65%) y gasificación (85%).

También se destaca la aplicación del SCG y CSS en el tratamiento de agua y suelo. Por su lado se encuentra la producción de carbón activado con ácido fosfórico, alcanzando altos niveles de eficiencia, estudiada en la adsorción de metales pesados como el cianuro en aguas residuales. Y por otro lado se encuentra la elaboración de biocarbón a base de CSS, el mismo que tiene la capacidad de aportar calidad a suelos arenosos en función de Ca, K, pH, así como la reducción de sustancias tóxicas.

Como se comparó previamente, los métodos tradicionales para la disposición final de residuos provenientes de la industria del café suponen una amenaza ambiental definitiva; en cambio, las estrategias de upcycling convierten estos residuos en oportunidades que impulsan la adopción de la economía circular en las industrias, aumentando la sostenibilidad y reduciendo la huella de carbono. Por lo tanto, su implementación atenua los efectos negativos resultantes de un manejo inadecuado de desechos, ubicando a la industria del café como un exponente destacado en sostenibilidad e innovación ambiental.

Es de alta relevancia que futuras investigaciones en la materia, orienten sus esfuerzos en abordar las regulaciones y la gestión de alternativas sostenibles, con miras a su implementación responsable, considerando su impacto sanitario y ambiental.

REFERENCIAS

- [1] International Coffee Organization, «The value of coffee: Sustainability, Inclusiveness, and Resilience of the Coffee Global Value Chain,» 2022.
- [2] S. C. T. F. E. G. H. M. N. R. P. v. d. G. M. Bozzola, «La Guía del Café, Cuarta edici,» Centro de Comercio Internacional, Ginebra, 2022.
- [3] Y. Fernández-Cortés, K. D. Sotto-Rodríguez y L. A. Vargas-Marín, «Impactos ambientales de la producción del café, y el aprovechamiento sustentable de los residuos generados,» *Producción + Limpia*, vol. 15, nº 1, pp. 93-110, 2020.
- [4] A. Pasquín Llorente, «EL UPCYCLING Y SU MODELO DE,» Madrid, 2023.
- [5] M. J. Page, J. E. McKenzie, P. M. Bossuyt, I. Boutron, T. C. Hoffmann, C. D. Mulrow, L. Shamseer, J. M. Tetzlaff, E. A. Akl, S. E. Brennan, R. Chou, J. Glanville,

- J. M. Grimshaw, A. Hróbjartsson, M. M. Lalu, T. Li, E. W. Loder, E. Mayo-Wilson, S. McDonald, L. A. McGuinness, L. A. Stewart, J. Thomas, A. C. Tricco, V. A. Welch, P. Whiting y D. Moher, «The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting,» 2021.
- [6] S. Sánchez-Serrano, I. Pedraza-Navarro y M. Donoso-González, «¿Cómo hacer una revisión sistemática siguiendo el protocolo PRISMA? Usos y estrategias fundamentales para su aplicación en el ámbito educativo a través de un caso práctico,» *Revista de Pedagogía*, vol. 74, nº 3, pp. 51-66, 2022.
- [7] M. Saeli, V. S. Batra, R. K. Singh, D. M. Tobaldi y J. A. Labrincha, «The coffee-house: Upcycling spent coffee grounds for the production of green geopolymers architectural energy-saving products,» *Energy and Buildings*, vol. 286, p. 112956, 2023.
- [8] L. Lombardo, T. Campisi y M. Saeli, «Spent Coffee Grounds-Based Thermoplastic System to Improve Heritage Building Energy Efficiency: A Case Study in Madonie Park in Sicily,» *Sustainability (Switzerland)*, vol. 16, nº 15, p. 6625, 2024.
- [9] R. Hou, X. Fan, H. Zhou, J. Yan, Z. Bai, W. Li y P. Liang, «Role of Maillard reactions in co-pyrolysis of lignite and spent coffee grounds: Fixation of nitrogen in semicoke and improved adsorption of phenols,» *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 173, p. 106106, 2023.
- [10] M. Pettinato, J. M. Domínguez, P. Perego y B. Fabiano, «A Biorefinery from Spent Coffee Grounds: from High-added Value Compounds to Energy by Innovative Processes,» *Chemical Engineering Transactions*, vol. 105, p. 331–336, 2023.
- [11] C. P. de Freitas, B. B. Marangon, E. G. Pereira y N. d. S. Renato, «EXPLORING SPENT COFFEE GROUNDS ENERGY POTENTIAL IN THE BRAZILIAN SCENARIO,» *Engenharia Agrícola*, vol. 43, 2023.
- [12] A. Pérez Calvo, N. Paz Ruiz y Z. Delgado Espinoza, «Coffee Pulp: A Sustainable and Affordable Source for Developing Functional Foods,» *Processes*, vol. 11, nº 6, p. 1693, 2023.
- [13] S. Biswal, F. Pahlevani, W. Wang y V. Sahajwalla, «Reduction Behavior of Hematite-Biowaste Composite Pellets at Melting Temperature,» *Steel Research International*, vol. 95, nº 2, 2024.
- [14] N. Zhao, Z. Liu, T. Yu y F. Yan, «Spent coffee grounds: Present and future of environmentally friendly applications on industries-A review,» *Trends in Food Science and Technology*, vol. 143, p. 104312, 2024.
- [15] A. González-Freire y C. M. Martínez-Hernández, «Mejoramiento y uso de los efluentes para el beneficio del café,» *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, vol. 31, nº 2, pp. 1-6, 2022.
- [16] R. Capuano, R. Avolio, R. Castaldo, M. Cocca, G. Gentile, T. Cirillo, A. Nolasco y M. E. Errico, «Upcycling coffee silverskin into biobased functional coatings,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 469, p. 143063, 2024.
- [17] M. A. Kougioumtzis, V. Filippou, A. Rontogianni, E. Karampinis, P. Grammelis y E. Kakaras, «Valorization of spent coffee ground by mixing with various types of residual biomass for pellet production: evaluation of solid biofuel properties at different mixtures,» *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, vol. 18, nº 4, p. 968–989, 2024.
- [18] D. San Martin, J. Ibarruri, N. Luengo, J. Ferrer, A. García-Rodríguez, I. Goiri, R. Atxaerandio, M. Medjadbi, J. Zufia, E. Sáez de Cámara y B. Iñarra, «Evaluation of Valorisation Strategies to Improve Spent Coffee Grounds' Nutritional Value as an Ingredient for Ruminants' Diets,» *Animals*, vol. 13, nº 9, p. 1477, 2023.
- [19] A. P. Filho, E. V. De Medeiros, J. R. S. Lima, D. P. Da Costa, G. P. Duda, J. S. A. Da Silva, J. B. De Oliveira, C. D. Antonino, R. S. Menezes y C. Hammecker, «Impact of coffee Biochar on carbon, microbial biomass and enzyme activities of a sandy soil cultivated with bean,» *Anais da Academia Brasileira de Ciencias*, vol. 93, nº 4, 2021.
- [20] E. C. Gazonato, A. A. D. Maia, V. A. Da Silva Moris y J. M. F. De Paiva, «Thermomechanical properties of corn starch based film reinforced with coffee ground waste as renewable resource,» *Materials Research*, vol. 22, nº 2, 2019.
- [21] S. Bianchi, M. Vannini, L. Sisti, P. Marchese, N. Mallegni, Ó. Rodríguez, S. Kohnen, J. Tchoumtchoua, P. Cinelli y A. Cell, «Valorization of coffee silverskin by cascade extraction of valuable biomolecules: preparation of eco-friendly composites as the ultimate step,» *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, vol. 18, nº 2, p. 524–542, 2024.
- [22] R. Nepal, H. J. Kim, J. Poudel y S. C. Oh, «A study on torrefaction of spent coffee ground to improve its fuel properties,» *Fuel*, vol. 318, p. 123643, 2022.
- [23] J. Remón, F. Ravaglio-Pasquini, L. Pedraza-Segura, P. Arcelus-Arrillaga, I. Suelves y J. L. Pinilla, «Caffeinating the biofuels market: Effect of the processing conditions during the production of biofuels and high-value chemicals by hydrothermal treatment of residual coffee pulp,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 302, p. 127008, 2021.
- [24] N. S. Barbosa, M. S. da Luz, N. G. Sousa y K. G. dos Santos, «Development and evaluation of slow-release organomineral phosphate fertilizer based on coffee waste,» *Ciência e Agrotecnologia*, vol. 22, nº 2, 2019.

- [25] L. E. N. de Castro, D. A. J. Battocchio, L. F. Ribeiro y L. M. S. Colpini, «Development of Adsorbent Materials Using Residue from Coffee Industry and Application in Food dye Adsorption Processes,» *Brazilian Archives of Biology and Technology*, vol. 66, 2023.
- [26] C. C. G. da Silva, E. V. de Medeiros, G. G. M. Fracetto, F. J. C. Fracetto, A. P. M. Filho, J. R. d. S. Lima, G. P. Duda, D. P. da Costa, M. A. L. Junior y C. Hammecker, «Coffee waste as an eco-friendly and low-cost alternative for biochar production impacts on sandy soil chemical attributes and microbial gene abundance,» *Bragantia*, vol. 80, 2021.
- [27] G. Aranguri-Llerena y W. Reyes-Lázaro, «Adsorption of cyanide contained in aqueous solution using activated carbon obtained from coffee residue: Absorption efficiency, equilibrium and kinetic model,» *Scientia Agropecuaria*, vol. 10, nº 3, pp. 315-325, 2019.
- [28] K. C. De Souza, N. M. Trindade, J. D. P. De Amorim, H. A. Do Nascimento, A. F. S. Costa , M. A. Henrique, V. F. Caetano, L. A. Sarubbo y G. M. Vinhas, «Kinetic study of a bacterial cellulose production by komagataeibacter rhaeticus using coffee grounds and sugarcane molasses,» *Materials Research*, vol. 24, nº 3, 2021.
- [29] K. A. Garibaldi-Alcívar, N. B. Montesdeoca-Pichucho, R. J. Baquerizo-Crespo, D. Oliva-Merencio, Y. Gómez-Salcedo y I. Pereda-Reyes, «ANAEROBIC CO-DIGESTION OF SOLID WASTE FROM COFFEE BENEFIT, BANANA PSEUDO-STEM AND PIG MANURE: KINETIC, ENERGY AND ENVIRONMENTAL CRITERIA,» *Centro Azúcar*, vol. 29, nº 2, pp. 60-72, 2022.
- [30] J. I. Nieto Juárez, A. D. Cuzcano Ruiz y W. A. Reyes López, «Evaluación del cultivo del hongo pleurotus ostreatus y de su composición nutricional en borra de café,» *TECNIA*, vol. 31, nº 2, pp. 27-32, 2021.
- [31] E. G. da Cunha, R. B. Guidinelle, R. R. Passos y O. J. P. Rangel, «Biochar and swine wastewater: Effects on soil fertility of different textures and corn nutrition,» *Revista Ceres*, vol. 68, nº 6, p. 586–596, 2021.
- [32] Y. S. Oh, «Evaluation of chestnut shell and coffee waste with phenol-formaldehyde resin for plywood filler,» *Ciencia Florestal*, vol. 31, nº 4, p. 1991–2001, 2022.
- [33] M. Kasbaji, M. Mennani, N. Grimi, M. Oubenali, M. Mbarki, H. EL Zakhem y A. Moubarik, «Adsorption of cationic and anionic dyes onto coffee grounds cellulose/sodium alginate double-network hydrogel beads: Isotherm analysis and recyclability performance,» *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 239, p. 124288, 2023.
- [34] R. P. Chávez, E. C. Pizarro y Y. L. Galiano, «Landfill leachate treatment using activated carbon obtained from coffee waste,» *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, vol. 24, nº 4, p. 833–842, 2019.
- [35] R. Carnier, A. R. Coscione, C. A. De Abreu, L. C. A. Melo y A. F. Da Silva, «Cadmium and lead adsorption and desorption by coffee waste-derived biochars,» *Bragantia*, vol. 81, 2022.
- [36] M. A. Da Costa, J. S. De Gois, I. M. Toaldo, A. C. F. Bauerfeldt, D. B. Batista, M. T. Bordignon-Luiz, D. C. Do Lago, A. S. Luna y L. F. De Senna, «Optimization of espresso spent ground coffee waste extract preparation and the influence of its chemical composition as an eco-friendly corrosion inhibitor for carbon steel in acid medium,» *Materials Research*, vol. 23, nº 5, 2020.
- [37] Y. Liu, W. Yuan, Y. Lu y S. Q. Liu, «Biotransformation of spent coffee grounds by fermentation with monocultures of *Saccharomyces cerevisiae* and *Lachancea thermotolerans* aided by yeast extracts,» *LWT*, vol. 138, p. 110751, 2021.
- [38] J. P. Ríos-Hernández, A. Chávez-Salazar, E. M. Restrepo-Montoya, F. J. Castellanos-Galeano y D. Y. Ospina-López, «Obtaining coffee mucilage microcapsules by spray drying using chemically modified banana starch,» *Ingeniería y competitividad*, vol. 26, nº 2, 2024.