

ANÁLISIS EXERGOAMBIENTAL EN FUENTES NO CONVENCIONALES DE ENERGÍA (FNCE): CASO CASCARILLA DE CAFÉ



Marlon Bastidas Barranco¹
Gelvis Melo Freile²
Daniela Torres³

Resumen

La cascarilla de café es uno de los cultivos agrícolas disponibles en La Guajira, cuyo material residual contiene un valor energético como fuente de mitigación de los combustibles fósiles. En esta investigación, se realizó una valoración exergetica y económica a partir de análisis de las características de la cascarilla de café como fuente sustentable de biomasa. Se realizó una revisión documental enfocada en el análisis termoeconómico a la cascarilla de café, considerando las diferentes

metodologías empleadas en la generación energética. El estudio demostró que la cascarilla de café es una fuente primordial de biomasa energética, concluyendo que es una alternativa sostenible de alto poder calorífico y que puede ser empleada como una estrategia en la disminución potencial de los efectos negativos en los recursos naturales impactados.

Palabras clave: exergoambiental, cascarilla de café, energía renovable.

EXERGO-ENVIRONMENTAL ANALYSIS IN NON-CONVENTIONAL ENERGY SOURCES (NCES): COFFEE SHELL CASE

Abstract

The coffee husk is one of the agricultural crops available in La Guajira, whose residual material contains an energy value as a source of mitigation of fossil fuels. In this research, an exergetic and economic evaluation was

carried out from the analysis of the characteristics of the coffee husk as a sustainable source of biomass. A documentary review was conducted focused on the thermoeconomic analysis of the coffee husk, considering the methodologies used in energy generation. The study demonstrated

¹Magister y Doctor en Ingeniería de Sistemas Energéticos, director del Semillero de Investigación de Energías Alternativas y Biomasa (SINEAB) de la Universidad de La Guajira. Correo: marlonjoseb@uniguajira.edu.co

²Magister Scientiarum en Ingeniería de Control y Automatización de Procesos de la Universidad Dr. Rafael Beloso Chacín en Maracaibo Venezuela. Adscrito a la Facultad de ingeniería de La Universidad de La Guajira. Correo: gelvismanuel@uniguajira.edu.co

³Ingeniera Ambiental de la Universidad de La Guajira. Correo: dandreatorres@uniguajira.edu.co

that the coffee husk is a primary source of biomass energy, concluding that it is a sustainable alternative with high calorific value and that it can be used as a strategy in the potential reduction of the negative effects on the impacted natural resources.

Keywords: exergoenvironmental, coffee shell, renewable energy.

Introducción

La principal fuente de sustento de los seres vivos es la tierra, siendo el hombre quien hace el mayor uso mediante prácticas agroindustriales que hacen de la agricultura una actividad estratégica para el bienestar de las comunidades, pero que conlleva a incremento paulatino de desechos agrícolas que afecta agresivamente el medioambiente, comprometiendo los terrenos baldíos cercanos a los cultivos, las fuentes hídricas y los propios cultivos (Sinergia, 2006).

En los países productores de café tales como Brasil, Vietnam, Colombia y Costa Rica, este último en menor escala que los primeros, los residuos y subproductos derivados del procesos de obtención del café son una fuente importante de contaminación; siendo dicho proceso señalado como el responsable de muchas dificultades ambientales que se debe pagar con un costo elevado, teniendo en cuenta los esfuerzos que se realizan para mejorar las variedades con la finalidad de aumentar la producción sin considerar los efectos ambientales ocasionados (Granados, 1994).

Los residuos sin tratar procedentes de las industrias tradicionales y modernas de procesamiento de café están amenazando las aguas superficiales mayoritariamente en los países en desarrollo, siendo la contaminación del agua el de mayor repercusión en los países productores de café (Beyene, 2012). En Brasil, la producción en los últimos cinco años varió de 2,0 a 2,7 millones de toneladas, dicha producción constituye un promedio de más de 2,5 millones de toneladas de residuos sólidos que se generan cada año (Oliveira et. al., 2008).

El proceso de beneficiado húmedo de la cascarilla de café representa una afectación de gran importancia teniendo en cuenta los impactos ambientales para los sistemas acuáticos, especialmente derivados del potencial fitotóxico, citogénico y mutagénico del agua residual del café en la germinación de semillas, elongación de la raíz y alteraciones del ciclo celular de una planta modelo como la *Lactuca Sativa*, encontrándose que la germinación total de la semilla es inhibida después de la exposición al efluente sin tratar (Louzada et. al., 2016). Igualmente, una evaluación de la calidad del agua donde los análisis fisicoquímicos y biológicos revelan un alto deterioro aguas abajo, encontrándose la carga orgánica alta de 1900 mg/L, el oxígeno disuelto disminuyó a 0,01 mg/L reflejándose una reducción de la nitrificación y los macroinvertebrados (Beyene, 2012).

En La Guajira se registra en 2014 una producción de 3924 toneladas de café del total de las 995000 hectáreas sembradas en Colombia, distribuidas en 21 departamentos y

592 municipios (Manual de Agricultura y Desarrollo Rural, 2014). En el procesamiento del café se estima que menos del 5% de la biomasa generada se aprovecha en la elaboración de la bebida aromática, el restante queda en forma residual representado en materiales lignocelulósicos como cáscaras, pulpa de café, tallos y hojas, los cuales influyen en la contaminación del medio ambiente por no ser tratados o reciclados (Rodríguez y Zambrano, 2010).

Con base a lo expresado, se realizó el análisis exergoambiental en fuentes no convencionales de energía (fnce): caso cascarilla de café, utilizando una revisión documental bibliográfica con bases de datos reconocidas a nivel internacional para garantizar la confiabilidad de los resultados y la validez de la información.

Fundamento teórico

El método de procesamiento de café húmedo que se utiliza comúnmente requiere enormes cantidades de agua para quitar la cáscara de café en donde se generan volúmenes de aguas residuales con alto contenido en materia orgánica. El efluente de una tonelada de café siguiendo el proceso de beneficiado húmedo genera una demanda bioquímica de oxígeno comparable a la DBO de los residuos humanos que puede ser generada por 2000 personas al día (Beyene, 2012).

Puesto que los desechos del proceso de beneficiado húmedo del café la pulpa, mucílago y aguas mieles son considerados altamente contaminantes, el caficultor no tiene una alternativa de uso de estos residuos orgánicos, por lo que existe la preocupación

por buscar alternativas para una disposición sustentable de los residuos y darles un aprovechamiento, como es el caso de la transición energética. La cascarilla de café puede ser utilizada en diferentes procesos con el fin de aprovechar sus propiedades y reducir los impactos mencionados anteriormente.

Entre los diferentes usos de la cascarilla de café, además del uso energético, está su reconversión en material adsorbente para la remoción de iones de metales pesados; en uno de los estudios de relevancia se muestra la remoción de Pb^{2+} en solución acuosa con una capacidad máxima de adsorción de $4,80 \text{ mg g}^{-1}$ (Barón, 2014).

Otro uso de la cascarilla de café es en la aplicación de biodigestores, los cuales se pueden emplear bajo condiciones meteorológicas adecuadas para obtener biogás y el lodo residual como bioabono; el biogás puede presentar una composición aproximada de 65,2% de metano, 29,7% de bióxido de carbono y 5 % de otros compuestos (Romero y Mamani, 2013).

Por otra parte, se puede obtener alimento a partir de cáscara de café con un sustrato adecuado para la producción con un rendimiento de 3,83 g/L de biomasa, cuyo contenido de proteínas aproximado de 41,49%, 16,51% de azúcares totales, 4,07% de lípidos y 15,99 % de humedad (Carrillo et. al., 2011).

El municipio de Villanueva, La Guajira no escapa a toda la problemática planteada en los párrafos anteriores, pues la siembra de café es una de las principales características

de esta zona en la cual no existen medidas que direccionen a la recolección y aprovechamiento de los residuos generados, siendo los recursos naturales como los acuíferos y el suelo los más afectados por la contaminación; en algunos casos, acciones de vertimiento de residuos o la quema a cielo abierto son considerados una práctica normal y no representa problemas para las comunidades, debido al escaso conocimiento y falta de pertenencia de los agricultores por el sostenimiento del territorio, especialmente cuando hay necesidad de realizar inversiones que afectan las utilidades (Cubides y Montaña, 2017).

Es evidente que el procesamiento del café trae repercusiones negativas sobre el medio ambiente, sin embargo, no se muestran indicadores permitan establecer la magnitud de las consecuencias y la manera como se puede contribuir con la minimización de los impactos generados.

En este trabajo, se hacen una serie de indicadores exergéticos que permiten establecer el grado de afectación y la manera cuantitativa de establecer la reducción de generación de CO₂ equivalente para atenuar los efectos al medio ambiente, mediante el análisis de la cascarilla de café, adicionalmente se recogen los resultados más importantes, presentando una información general de la situación que permite la comparación y extrapolación a nuevos escenarios como el del aprovechamiento en la agricultura de la cascarilla de café en el municipio de Villanueva, La Guajira empleando la transición energética del residuo.

Métodos

Se emplea un tipo de metodología bibliográfica porque se deriva de fuentes tomadas de la literatura en bases de datos reconocidas como ScienceDirect, Elsevier, ResearchGate, Dialnet en donde se realizó un barrido de trabajos en un 56,8% de artículos entre el 2014 al 2018, 21,5% de 2010 a 2013 y un 21,5 % con fecha menor al 2010, con un total de 51 artículos.

Con la información obtenida se hizo una clasificación de temáticas directamente relacionadas a la cascarilla de café, el impacto ambiental generado por las cascarillas y las diferentes metodologías empleadas en la transición energética de este residuo agrícola.

Adicionalmente, según el grado de generalización se emplea un método deductivo en el que se parte de una premisa general para obtener conclusiones de un caso particular, utilizando la información para la conformación de datos en la zona rural proyectada del municipio de Villanueva (Hernández y Fernández, 2003).

Villanueva se encuentra ubicado al sur de La Guajira (Colombia) ocupando una extensión de 26770 hectáreas, de las cuales 7300 son utilizadas para la agricultura y 8600 para la ganadería; 10416 son áreas no cultivadas mientras 454 corresponden al área urbana.

En este municipio, el café ha sido uno de los cultivos tradicionales manifestado en el uso de las calles y parques para el secado y por la participación de Villanueva en el Comité de cafeteros del Cesar y La Guajira, entidad que

regula más de 250 caficultores y proporciona la venta del grano a distintas federaciones. A pesar que se hizo la solicitud de información en el Comité de Cafeteros, no hubo respuesta al respecto, por lo que se acudió a otras fuentes como el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, de la que se obtuvo información consolidada del año 2014 en La

Guajira, tales como el área sembrada del café, área cosechada, producción y rendimiento, teniéndose respectivamente 6790 ha sembradas, 6079 ha cosechadas, una producción de 3924 ha y un rendimiento de 0,65 t/ha, tal como se aprecia en la Tabla 1.

Tabla 1. Condiciones de siembra de café en Villanueva, La Guajira, Año 2014.

	Área sembrada (ha)	Área cosechada (ha)	Producción (t)	Rendimiento (t/ha)
Café	1.167	1.028	734	0,7

Fuente: Manual de Agricultura y Desarrollo Rural, (2014).

Posteriormente, se tomó información y se clasificó en tres temáticas fundamentales que son: cascarilla de café, transición energética y análisis exergoambiental; esto con el fin de establecer hacia donde están encausados los estudios y poder plantear discusiones al respecto de dichas temáticas.

Finalmente, se extrajo la información sobre la transición energética y se tomaron datos exergéticos de la cascarilla de café para establecer comparaciones de la reducción de CO₂ equivalente con respecto a otros combustibles.

Resultados y discusión

Por medio del barrido de artículos se realizó una clasificación por año donde se da a conocer la temporada en que se enfatizó especialmente en la temática asociada a la cascarilla de café.

En la figura 1 se puede observar que entre los años 2010 al 2013 y con fecha menor al 2010 sólo el 21,5% de artículos desarrollaron este tema mientras que del año 2014 al 2018 se encontraron cerca de 56,8% obteniendo el mayor porcentaje, esto podría estar sujeto a la concientización de los últimos años sobre el uso indiscriminado de los combustibles fósiles y a la preocupación de emplear tecnologías amigables con el medio ambiente.

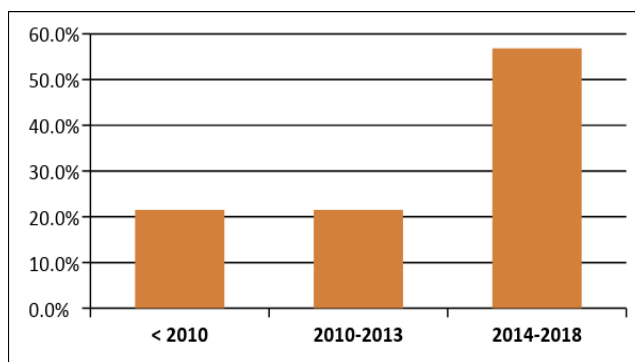


Figura 1. Clasificación de los artículos revisados por años.
Fuente: Elaboración Propia, (2018).

De otra forma, se identificaron los autores que constantemente publican artículos acerca de la cascarilla de café como se observa en la Tabla 2; siendo recurrentes Jofran Luiz de Oliveira, Jadir Nogueira da Silva, Emanuele Graciosa

Pereira con la publicación de dos artículos en el año 2013 y en el 2018. De igual manera, Leandro S. Oliveira, Adriana S.

Franca, Sonia D. Rocha con la publicación de tres artículos en el año 2007, en 2008 y en el 2009.

Tabla 2. Identificación de autores recurrentes en la temática de cascarilla de café.

Años	Autores	Artículos
2013 y 2018	Jofran Luiz de Oliveira	2
	Jadir Nogueira da Silva	
	Emanuele Graciosa Pereira	
2007,2008 y 2009	Leandro S. Oliveira	3
	Adriana S. Franca	
	Sonia D. Rocha	

Fuente: Elaboración Propia, (2018).

Así mismo, en la Figura 2 se puede observar que, de los 51 artículos analizados, el 45 % corresponde a la temática de transición energética en donde se emplean diferentes metodologías para el aprovechamiento de la cascarilla de café, el 33% corresponde a artículos enfocados a la caracterización de la cascarilla en donde se dan a conocer propiedades físicas, químicas y calóricas que la permiten ser considerada como biomasa y utilizar sus características

para diferentes aplicaciones comunes y 22% restante corresponde a artículos donde se dan a conocer metodologías y alternativas enfocadas a contrarrestar los efectos negativos producto del manejo y disposición inadecuada de la cascarilla de café por parte de los agricultores e industrias especializadas en el tema.

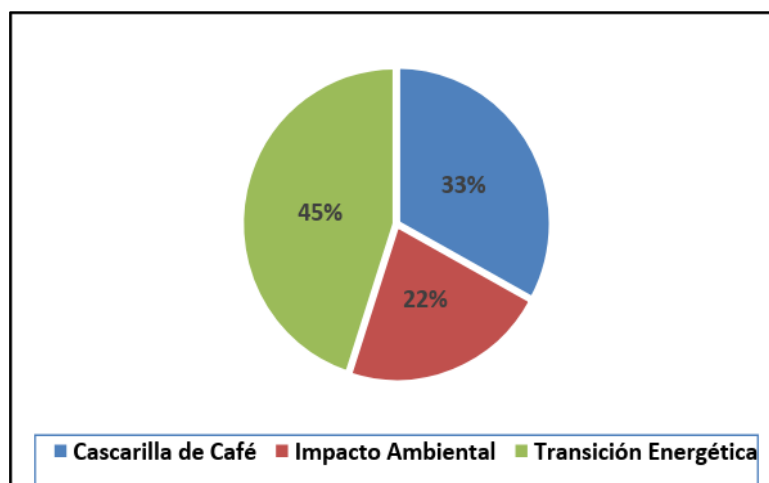


Figura 2. Temáticas principales analizadas en la revisión bibliográfica realizada.

Fuente: Elaboración Propia, (2018).

La cascarilla de café.

base esto se puede conocer si este residuo puede ser considerado como biomasa. En la tabla 3 se realizó una comparación de datos observa para dos autores distintos que el poder calorífico de la cascarilla se encuentra entre 14215 kJ/kg y 31204 kJ/kg respectivamente (Toscano, 2009; Arias y Meneses, 2016).

Estos valores con tan notable diferencia pueden deberse al tipo de café o al lugar donde es cultivado teniendo en cuenta que Toscano (2009) realizó la investigación en Guayaquil, Ecuador donde se siembra Arábigo lavado, Arábigo natural y robusta,

mientras que Arias y Meneses (2016) en Managua, Nicaragua la variedad arábica. Con respecto al porcentaje de humedad, se observa que se encuentra en un promedio de 10,6 % siendo el valor mínimo reportado entre 8,6% y 9,3%. Cabe mencionar que para

La caracterización fisicoquímica y calórica de la cascarilla de café es de especial importancia pues en de diversos autores donde se destacan y comparan diferentes parámetros del residuo, se procesos energéticos la biomasa debe de tener un contenido de humedad inferior al 30% (Arias y Meneses, 2016).

El material volátil y el diámetro de la partícula son directamente proporcionales pues al disminuir el tamaño de la partícula, la cantidad de volátiles se reduce y además la ceniza aumenta como lo reportado por Arias y Meneses (2016) y Manals-Cutiño et. al., (2018). Igualmente, en la Tabla 3, como parte del análisis último realizado se muestra que no hubo una diferencia significativa, presentado para los elementos como el azufre un porcentaje de 0,3 % y el fósforo 0,07%, mientras que el potasio, el calcio y el magnesio presenta porcentajes mayores del orden de 2,67%, 3,01% y 0,33%, respectivamente (Conesa et. al., 2016), lo cual

es una evidencia de la presencia en buena cantidad de metales alcalinos y alcalinotérreos en las cenizas de cáscara de café adecuadas para sustituir los feldespatos tradicionales, que se usan mayoritariamente como fundentes en formulaciones cerámicas a base de arcilla (Acchar et. al., 2013).

En cuanto a los porcentajes de celulosa, hemicelulosa y lignina, se puede apreciar en las últimas filas de la Tabla 3, que hay

diferencias marcadas reportadas entre Manals-Cutiño et.al (2018) y Conesa et.al (2016), dichas diferencias se atribuyen a la diversidad del café; aunque los valores obtenidos son ideales para la obtención de azúcares simples y bioetanol a través de la transformación de la celulosa (Arias y Meneses, 2016).

Tabla 3. Caracterización fisicoquímica de la cascarilla de café según varios autores.

PARÁMETROS	(Toscano, 2009)	(Arias y Meneses, 2016)	(Manals-Cutiño et. al., 2018)	(Conesa et. al., 2016)	(Alvarez, 2016)
Poder Calorífico (KJ/kg)	14215	-	31204,27	-	-
Contenido de Humedad (%)	10	10,1	8,6	15	9,3
Material Volátil (%)	-	82	87,7	-	-
Contenido de Cenizas (%)	0,6	1,2	10,5	5,4	3,2
Carbono (%)	46,4	50,3	-	-	44
Hidrógeno (%)	4,86	5,3	-	-	6,1
Oxígeno (%)	46,7	43,8	-	-	45,3
Nitrógeno (%)	0,59	<1	-	-	1,1
Azufre (%)	0,59	-	-	-	0,3
Fosforo (%)	-	-	0,1	-	0,07
Potasio (%)	-	-	3,03	-	2,67
Calcio (%)	-	-	0,25	-	3,01
Magnesio (%)	-	-	0,05	-	0,33
Celulosa (%)	-	-	36,7	24,5	-
Lignina (%)	-	-	15,93	23,7	-
Hemicelulosa (%)	-	-	47,37	27,7	-

Fuente: Elaboración Propia, (2018).

Hay que mencionar que la cascarilla de café tiene diversas aplicaciones dentro de las cuales pueden observarse en la figura 4, algunas de dichas aplicaciones, teniendo en cuenta el porcentaje de trabajos revisados distribuidas en Transición Energética, Sustrato, Material Adsorbente, Materia Prima y Otros Usos.

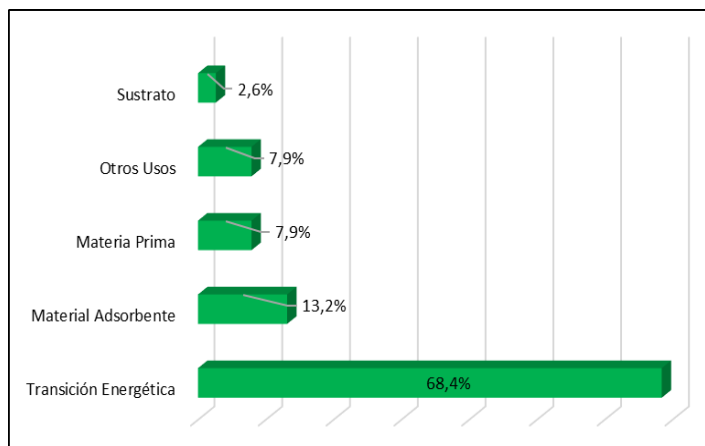


Figura 3. Porcentaje de publicaciones relacionadas con aplicaciones de cascarilla de café.
Fuente: Elaboración Propia, (2018).

Según las aplicaciones, se utiliza la cascarilla como sustrato en el crecimiento de la levadura *Candida utilis* con un rendimiento de 3,83 g/L de biomasa, proteínas 41,49%, 16,51% de azúcares totales, 4,07% lípidos y 15,99 % de humedad (Carrillo et. al., 2011); es empleada con porcentajes aproximados de 10% en mezclas utilizadas en la elaboración de materiales de construcción (Roque et. al., 2013), en la preparación de papel debido al porcentaje de celulosa como principal componente (Coffea, 2010); mediante las cenizas como fundente en baldosas de cerámica (Acchar et. al., 2013) y finalmente como material biosorbente para el tratamiento de aguas contaminadas con colorantes

(Oliveira et. al., 2008) o para la remoción de iones de Pb^{2+} , presentando capacidad de adsorción de 37,04 mg/g en soluciones acuosas (Alhogbi, 2017).

El mayor porcentaje de aplicación se presenta, según la Figura 4, en la Transición Energética de la cascarilla de café con un 68,42%, esto quiere decir que se está empleando este residuo para la generación de diferentes biocombustibles y la generación directa de energía, tal como se muestra la distribución de trabajos revisados sobre aplicaciones de la Transición Energética presentada en la Figura 5.

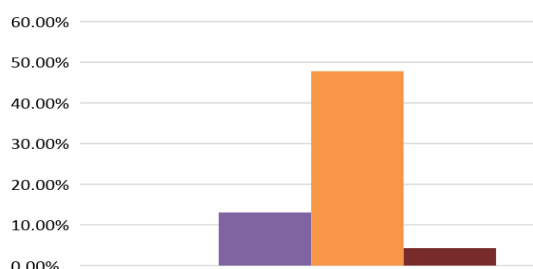


Figura 4. Porcentaje de categorías con mayor aplicación energética de la cascarilla de café.
Fuente: Elaboración Propia, (2018).

Transición energética.

La reconversión energética de la cascarilla de café se emplea mayoritariamente en la generación de biocombustibles. Según Mera y Simbaña (2016) "...la adecuación de biomasa y fabricación de biocombustibles sólidos, es una de las principales alternativas para satisfacer la demanda energética de las empresas; además de utilizar residuos agroindustriales es una fuente para la generación de empleo...", lo que quiere decir que hay un nicho para aprovechar en el futuro cercano a través del uso de la biomasa.

De acuerdo con las propiedades observadas en la Tabla 3, la cascarilla es considerada como materia prima apta para la elaboración de biocombustibles (Arias y Meneses, 2016). La obtención de etanol de material lignocelulósico a partir de la cascarilla

de café es una metodología beneficiosa pues este residuo presenta un alto contenido de celulosa; sustrato de interés para la obtención de etanol, considerándose viable la generación a partir de este residuo agrícola (Vázquez, 2015). Así mismo, se puede alcanzar tasas de producción de etanol entre 1,1 y 0,70 $gh^{-1} kg^{-1}$ sin pretratamiento 2,7 y 2,3 $gh^{-1} kg^{-1}$ y sustancia seca con pretratamiento suave respectivamente (Tehrani et. al., 2015). Igualmente, el bagazo de caña de azúcar y la cascarilla de café se mezclan según la relación de la Tabla 4, para la producción de bioetanol teniendo como premisa que el bagazo de caña de azúcar posee un alto rendimiento para la producción de etanol de 300 – 359 litros de etanol por tonelada de bagazo de caña de azúcar (Álvarez, 2016).

Tabla 4. Resultados de la comparación de mezclas realizadas

Mezcla 90:10	Mezcla 70:30	Mezcla 50:50
157 L/Ton	183,09 L/Ton	168,68 L/Ton

Fuente: Álvarez, (2016).

En Villanueva, teniendo en cuenta que al año 2014 se produjeron 734 toneladas de café (Manual de Agricultura y Desarrollo Rural, 2014) y que se estima que por cada tonelada de frutos de café se producen alrededor de 0,18 toneladas de cascarilla de café (Álvarez, 2016), la cantidad generada fue de 132,12 toneladas de cascarilla en ese año. Teniendo en cuenta lo demostrado por Álvarez (2016) "...por tonelada de cascarilla de café se producen entre 286,63 y 351,13 litros de etanol...", por correlación se puede estimar

que en el municipio se producirían cerca de 46391,3 litros de comburente. Por otra parte, Dos Santos, Herrera, et al. (2018), ejecutaron el proceso de ozonización de las cáscaras de café para la generación de hidrolizados que se emplearía en la producción de biogás mediante digestión anaeróbica en el cual la producción más alta de metano fue de 36 NmLCH₄/g CH en donde se recuperó 0,064 kJ/g CH de energía.

Posteriormente, se agregó carbón activado en polvo debido a la presencia de compuestos tóxicos en el hidrolizado lo cual mejoró la producción de biogás en 86 NmLCH₄/gCH y 0,58 kJ/gCH en recuperación de energía, respectivamente.

Teniendo en cuenta la recuperación de energía obtenida y el total de cáscaras producidas en el 2017 (2,7 millones de toneladas), si todos los residuos se transforman en metano el potencial de energía sería de 0,435 GWh (Dos Santos et. al., 2018). En Villanueva el potencial estaría alrededor de $2,43 \times 10^{-2}$ GWh con 132,12 toneladas de cascarilla de café producidas en el 2014.

En otro orden de cosas, las briquetas desarrolladas a partir de cáscaras de café son empleadas como fuente de combustible sostenible para labores domésticas de cocina.

En este proceso se debe de tener en cuenta que se necesita de aglutinantes para de esta manera cohesionar los materiales; en este caso Lubwama y Yiga (2017), emplearon arcilla y almidón de yuca en donde la cascarilla de café con aglutinante de yuca presento el valor de calentamiento más alto 21,9-23,0 MJ/kg mientras que el de arcilla 13,0 a 19,523 MJ/kg; esto es debido al tipo de aglutinante utilizado pues en general cambia propiedades tanto físicas como su porcentaje calorífico y a la presencia de ceniza de SiO₂ en la arcilla (Lubwama y Yiga, 2017).

Igualmente, Mera y Simbaña (2016) destacan que "...una briqueta de residuos lignocelulósicos en promedio puede superar las 3500 kcal. kg⁻¹ en comparación de la leña que bordea las 2300 kcal. kg⁻¹...". En la Tabla 5 los resultados demostraron que la cascarilla de café compacta en un bloque sólido supera ampliamente la leña de eucalipto y de espino en cuanto a sus poderes caloríficos.

Tabla 5. Relación de PC de briquetas de diferentes precursores.

Cascarilla de café	Leña de eucalipto	Leña de espino
17415,1 kJ. kg ⁻¹	9095,6 kJ. kg ⁻¹	9356,4 kJ. kg ⁻¹

Fuente: Mera y Simbaña, (2018).

Por otra parte, Dicovskiy et al. (2014) reemplazaron la leña con briquetas elaboradas de cascarilla de café en la producción de rosquillas de maíz, resultando que las briquetas constan de un 25% más de poder energético que la leña de ripio de pino, además que la generación de ceniza es muy poca en comparación con la leña.

Otra ventaja de las briquetas de cascarilla de café es que no afecta la valoración sensorial de las rosquillas de maíz. En cuanto a la

generación de energía eléctrica, en la figura 5 se observa que es muy poca la aplicación realizada en esta temática teniendo en cuenta el alto precio de las fuentes tradicionales de energía, la elevada demanda y los impactos ambientales por el uso de esta.

Se ha propuesto un gasificador de cascarilla de café cuyo producido sea usado por un generador de 15 y 25 kW debido a que las fincas escogidas como objeto de estudio consumen mensualmente 3443 kWh.

Considerando que la cascarilla de café cuenta con un porcentaje de humedad por debajo del 12% y contenido de celulosa mayor de 50% se infiere como un recurso atractivo para ser empleado en el proceso de gasificación con el objetivo de obtener energía eléctrica (Arenas, 2016).

Análisis Exergoambiental.

No se especifica en la literatura un análisis de este tipo a la cascarilla de café, lo que le representa un aspecto de interés para la toma de decisiones frente al uso de este tipo de energéticos. Teniendo en cuenta el poder calorífico de la cascarilla de café, tal como se muestra en la Tabla 5, hay una evidente posibilidad de energético para ser aprovechado en las propias plantaciones de café o como una alternativa de generación en Zonas No Interconectadas (ZNI).

No obstante, para fincas que consumen mensualmente unos 3500 kWh/mes como la reportada por Arenas (2016), se requeriría una planta de aproximadamente 20 kW, la cual para una eficiencia de 25%, para el caso de este tipo de energéticos, entonces el aporte de la cascarilla de café estaría alrededor de 80 kW, con lo que se puede establecer la cantidad másica de cascarilla de café para la generación eléctrica, según la Ecuación 1.

según la fuente de generación relacionando la cantidad de CO₂ equivalente con base en la potencia entregada a un sistema energético.

$$\dot{m} = \frac{\dot{W}}{PC} \quad 1$$

Donde \dot{m} es el flujo másico de cascarilla de café, \dot{W} es la potencia de generación y PC es el Poder Calorífico de la cascarilla de café.

Desarrollando los cálculos, la masa de cascarilla de café sería de 16,5 kg/h de cascarilla de café; esto para un sistema que opera 8 horas diarias durante un mes serían 4 toneladas de cascarilla de café mensuales, si se tienen en cuenta las 132, 12 toneladas de cascarilla de café que se producen en Villanueva al año, se tendría suficiente cascarilla de café para electrificar 3 fincas de las mismas características.

Por otra parte, desde el punto de vista ambiental, es una posibilidad de real de disminuir las emisiones de CO₂ a la atmósfera, teniendo en cuenta que para generar energía de la forma convencional implica tomar la electricidad del sistema interconectado o empleando combustibles fósiles.

En la Figura 6 se muestra la comparación de las emisiones para diferentes alternativas de generación para un sistema requerido para Villanueva, con base en el modelo de cálculo de emisiones tomado de la Universidad de Zaragoza (revisado el 20 de octubre de 2018), en el cual se determinan los factores de emisiones

En la figura se observa que el tipo de electrificación que genera mayor cantidad de CO₂ equivalente sería el de interconectado, teniendo en cuenta que una buena parte de

este recurso es derivado de combustibles fósiles y hay muchas pérdidas energéticas por la transformación de la energía y el transporte.

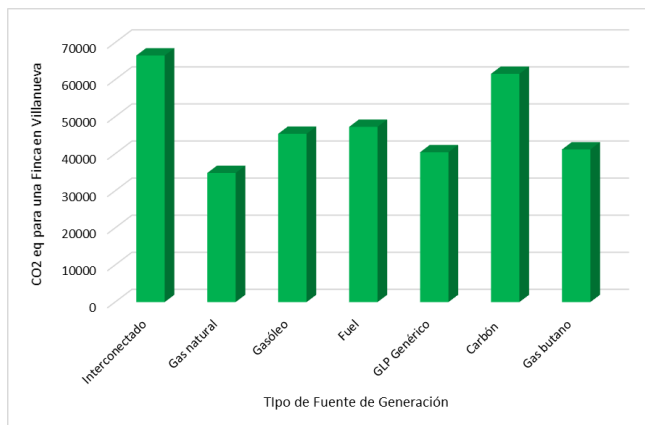


Figura 5. Emisiones de CO₂ equivalente que puede sustituir la cascarilla de café para producir 172,8 MWh cada año para diferentes fuentes de generación eléctrica.

Fuente: Elaboración Propia, (2018)

Se observa que todas las fuentes pueden generar emisiones gases de efecto invernadero al entregar energía, siendo el de menor impacto el generado por gas natural, lo que hace atractiva a la cascarilla de café para producir energía, aunque represente un costo adicional que implica el pretratamiento.

Conclusiones

La cascarilla de café es una fuente residual de biomasa con alto poder calorífico, suficiente para ser aprovechado de manera sostenible en ZNI, no solo como energético, también puede ofrecer la oportunidad para mundo, del clima y de la preferencia del café cosechado, considerando que entre las especies existentes de este fruto puede haber diversificación de los productos generados.

producir biocombustibles, sustratos, materiales adsorbentes, entre otros componentes que haría de este material ya no un desecho, sino una materia prima con un potencial interesante para ser aprovechado eficientemente.

La caracterización fisicoquímica de la cascarilla de café es el parámetro determinante para la cantidad de generación de biocombustibles, sin embargo, este residuo presenta notables diferencias entre especies de cafetos, debido a las condiciones de los suelos en distintas zonas del

Se determinó que, en el municipio de Villanueva, La Guajira en el año de 2014 se generaron cerca de 132,12 toneladas de cascarilla de café las cuales no tuvieron utilización alguna, los cuales pueden generar electricidad y sustituir la carga de

producción de CO₂ equivalente por los procesos derivados en las fincas. Se puede generar exergía en sistemas de potencia del orden de los 20 kW por lo menos para tres fincas de características similares entre sí, propiciando una reducción de la contaminación por emisiones de gases.

Referencias bibliográficas

- Alhogbi, B. (2017). Potential of coffee husk biomass waste for the adsorption of Pb (II) ion from aqueous solutions. *Sustain. Chem. Pharm.*, vol. 6, no. May, pp. 21–25.
- Álvarez, A. (2016). Caracterización fisicoquímica de varios residuos agroindustriales y sus mezclas para la producción de biocombustibles. Trabajo de grado Universidad Santo Tomás. Facultad de Química Ambiental Bucaramanga. p. 85.
- Arenas, D. (2009), Propuesta de diseño de un proceso para la generación de energía eléctrica a partir de los residuos de la producción de café. p. 147.
- Arias, R., Meneses, J. (2016). Caracterización residuos agroindustriales (cascarilla de arroz y cascarilla de café), como materia prima potencial para la obtención de bioetanol. *Laboratorios de Química UNAN-Managua I-II semestre 2016*, p. 122.
- Barón, P. (2014), Evaluación de la cascarilla de café como material adsorbente para la remoción de iones plomo Pb²⁺ presente en soluciones acuosas. p. 67.
- Beyene, A. (2012), (et al., “The impact of traditional coffee processing on river water quality in Ethiopia and the urgency of adopting sound environmental practices,” *Environ. Monit. Assess.*, vol. 184, no. 11, pp. 7053–7063.
- Cárdenas, J. Vásquez, J. (2013). Análisis del ciclo de vida del procesamiento y la distribución del café del beneficio ecológico en la finca Juancito y convencional en la finca La Montaña, Francisco Morazán, Honduras. p. 22.
- Carrillo, M., Zavala, D., Alvarado, B., Morales, K., & Bautista, P. (2011). Obtención De Biomasa a Partir De Cascara De Café. *Rev. Acad. Investig.*, no. January, p. 14..
- Coffea, “La cascarilla de café como materia prima para elaborar papel,” *Univ. Nac. Auton. Mexico*, pp. 1–13, 2010.
- Conesa, J., Sánchez, N., Garrido, M, Casas, J .(2016). Semivolatile and Volatile Compound Evolution during Pyrolysis and Combustion of Colombian Coffee Husk. *Energy and Fuels*, vol. 30, no. 10, pp. 7827–7833.
- Cubides-Hernandez, A. Montaña-Martinez, C. (2017). Evaluación del impacto ambiental generado por los residuos peligrosos en el sector agrícola en la vereda de Chámeza, municipio de Nobsa, Boyacá. *Universidad nacional abierta y a distancia, Sogamoso, Boyaca*, p. 184.
- De Oliveira, J., Da Silva, J., Graciosa, E., Oliveira, D, Rizzo, D. (2013). 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.
- De Oliveira, J., Da Silva, J., Martins, M., Pereira, G, Da Conceição, M. (2018). Gasification of waste from coffee and eucalyptus production as an alternative source of bioenergy in Brazil *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 27, no. March, pp. 159–166.

- Dicovski, L., Pichardo, C., Rodríguez, A., Martínez, B., Rodríguez, K. (2014), "Validación de briquetas elaboradas con cascarilla de café para el remplazo de leña en la producción de rosquillas de maíz. validation briquettes made whit deseeded coffee for replacement of wood in the production of corn rosquillas.," *El Higo*, vol. 4, pp. 10–19.
- Dos Santos, L., Herrera, O, Lobo, B., Alves, L., Aquino, S. (2018). Production of biogas (methane and hydrogen) from anaerobic digestion of hemicellulosic hydrolysate generated in the oxidative pretreatment of coffee husks. *Bioresour. Technol.*, vol. 263, no. March, pp. 601–612.
- Franca, S, Oliveira, L. (2009), *Coffee Processing Solid Wastes: Current Uses and Future Perspectives*, no. January.
- Garay, J, Rivero, J. (2014), "Biosistema para purificar aguas residuales del beneficio húmedo de café, distrito La Coipa , departamento de Cajamarca , 2014," vol. 11, no. 1, pp. 43–50.
- Granados, C. (1994), "El impacto ambiental del café en la historia costarricense," p. 34.
- Louzada, L, Fonseca, L, De Oliveira, J. (2016), "Evaluation of the toxic potential of coffee wastewater on seeds, roots and meristematic cells of *Lactuca sativa* L.," *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, vol. 133, pp. 366–372.
- Hernández, R., Fernández, C.,(2003) *Metodología de la Investigación*. Editorial Mc Graw Hill. México.
- Lubwama, M, Yiga, V. (2017), "Characteristics of briquettes developed from rice and coffee husks for domestic cooking applications in Uganda," *Renew. Energy*, p. 51.
- Manals-Cutiño, E., Salas-tort, D, Penedo-Medina, E. (2018), "Caracterización de la biomasa vegetal ' cascarilla de café ,'" vol. XXXVIII, no. 1, pp. 198–213.
- Lizarralde, R. (2014). *Manual de Agricultura y Desarrollo Rural*, "Principales Cultivos por Área Sembrada en el Año 2014 Cultivo,"
- Mera, M., Simbaña, E., (2016). "Evaluación de la capacidad calorífica de biocombustible sólido a partir de residuos lignocelulósicos de café" *Axioma*, pp. 35–41,
- Moreno-Ramón, H., Quizembe, S, Ibáñez-Asensio, S. (2014). "Coffee husk mulch on soil erosion and runoff: Experiences under rainfall simulation experiment," *Solid Earth*, vol. 5, no. 2, pp. 851–862.
- Oliveira, L., Franca, A, Alves, T, Rocha, D.(2008), "Evaluation of untreated coffee husks as potential biosorbents for treatment of dye contaminated waters," *J. Hazard. Mater.*, vol. 155, no. 3, pp. 507–512.
- Oliveira, W, Franca, A., Oliveira, L, Rocha, S, (2008), "Untreated coffee husks as biosorbents for the removal of heavy metals from aqueous solutions," *J. Hazard. Mater.*, vol. 152, no. 3, pp. 1073–1081.
- Pantoja-Figueroa, C., Rosero-Rodríguez, A, Rosero, L. (2016), "Los residuos de la poscosecha del café 1." San Juan de Pasto, pp. 1–78.
- Perez, N, Castillo, R, Carballo, L, Veliz, J. (2010), "Impacto ambiental en el cultivo y procesamiento del café y su repercusión social.," p. 22.
- Rodríguez, N, Zambrano, D. (2010). Los subproductos del café: fuente de energía renovable," *Av. Técnicos Cenicafé*, no. 3, p. 8.
- Romero, R., Mamani, R. (2013). Obtención de biogás como fuente de energía renovable a

- partir de los subproductos del café,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 15, pp. 241–252.
- Roque, H, Medrano, J, Sierra, J. (2013). Aprovechamiento de la cascarilla de café en la elaboración de materiales de construcción,” *El Hlgo - Rev. Ciencia y Tecnol.*, vol. 3, pp. 7–9.
- Sinergia, L (2006) “Producción Respetuosa en Viticultura-Impactos Ambientales en Agricultura,” *Proy. Life Sinerg.*, pp. 1–11.
- Tehrani, N., Aznar, J, Kiros, Y. (2015). Coffee extract residue for production of ethanol and activated carbons. *J. Clean. Prod.*, vol. 91, pp. 64–70, 2015.
- Toscano, L. (2009). Análisis de los parámetros y Selección de hornos para la combustión de biomasa’ (aplicación a biomásas locales típicas). p. 181,
- Vázquez, O. (2015). Etanol Lignocelulósico , a partir de cascarilla de café , por medio de hidrólisis química-enzimática y fermentación. p. 150.