



REVALORIZACIÓN DE RESIDUOS DEL CULTIVO DE CAFÉ: RUMBO A UNA ECONOMÍA CIRCULAR

REVALUATION OF COFFEE CROP WASTES: TOWARDS A CIRCULAR ECONOMY

Gutiérrez-Antonio Claudia^{*}, Rodríguez-Romero Luis Antonio¹, García-Trejo Juan Fernando¹, Feregrino-Pérez Ana Angélica

¹ Facultad de Ingeniería, Campus Amazcala, Universidad Autónoma de Querétaro, Carretera a Chichimequillas s/n km 1, 76225, El Marqués, Querétaro.

* Autor de correspondencia, correo:

Resumen

Actualmente, la mayoría de la energía que se emplea en el mundo se genera de la quema de combustibles fósiles, lo cual está ocasionando un impacto negativo al medio ambiente. Adicionalmente, la extracción de dichos combustibles es cada vez menor y más costosa, por lo que es necesario emplear fuentes de energía renovables. Una de estas fuentes es la biomasa, a partir de la cual se puede generar energía, eléctrica y calorífica, así como biocombustibles. En particular, los biocombustibles pueden producirse a partir de la biomasa tanto cultivable como residual, siendo ésta última de gran relevancia porque permite resolver el problema de contaminación que dichos residuos representan. En especial, los residuos del cultivo de café son abundantes, dado que representan dos tercios de la cantidad de café producida. Por ello, en este artículo se presenta el potencial de revalorización de estos residuos, con especial énfasis en su conversión a biocombustibles.

Palabras claves: *residuos de café, revalorización, biocombustibles, productos de valor agregado.*

Abstract

Nowadays, most of the energy used in the world is generated from the burning of fossil fuels, which is causing a negative impact on the environment. Additionally, the extraction of these fuels is becoming less and more expensive, so it is necessary to use renewable energy sources. One of these sources is biomass, from which energy, electrical and heating, as well as biofuels can be generated. In particular, biofuels can be produced from both cultivable and residual biomass, the latter being of great relevance because it allows solving the pollution problem that those residues represent. In particular, residues from coffee cultivation are abundant, accounting for two-thirds of the amount of coffee produced. Therefore, this article presents the potential for revaluation of this waste, with special emphasis on its conversion to biofuels.

Keywords: coffee waste, revaluation, biofuels, value-added products.

1. Introducción

En la actualidad, el aumento acelerado de la población mundial ha ocasionado un incremento en la demanda de los servicios básicos, entre los que se incluyen la alimentación, el transporte, y la infraestructura para tener una vida saludable. Para proveer todos los servicios básicos antes mencionados se requiere energía, la cual se genera, principalmente, mediante combustibles fósiles (carbón, gas natural y petróleo); estos combustibles son no renovables, por lo que su producción será menor y más costosa con el paso del tiempo. Cabe mencionar que en 2019 el 81% de la producción mundial de energía se generó a partir de combustibles fósiles, siendo el petróleo la fuente más usada (IEA, 2019). Sin embargo, a fines del 2019 comenzó la caída en la demanda de combustibles fósiles debido a las cuarentenas impuestas por la diseminación del coronavirus SARS-COV2, también conocido como COVID-19. A pesar de ello se espera que se recuperen los niveles de demanda en un par de años. Adicionalmente, el uso intensivo de dichos combustibles fósiles ha ocasionado el problema del cambio climático, que se deriva del incremento de la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera. En este contexto se han impulsado propuestas que permitan la recuperación económica y al mismo tiempo sostenible de los sectores económicos (IEA, 2020). Por lo que uno de los grandes retos en materia energética es encontrar fuentes de energía alternativas a los combustibles fósiles, que sean amigables con el medio ambiente, renovables y competitivas económicamente.

Algunas de las fuentes alternativas que se han estudiado incluyen la radiación solar, el flujo de viento, las corrientes de agua, o el calor del subsuelo, las cuales pueden usarse para generar energía eléctrica y/o calorífica. Otra fuente alternativa es la biomasa, la cual es muy atractiva, ya que permite obtener energía eléctrica, calorífica y/o biocombustibles. En particular, los biocombustibles son aquellos combustibles producidos a partir de la biomasa mediante diferentes procesos de conversión; los biocombustibles se pueden presentar en estado líquido (diésel verde, bioturbosina), sólido (briquetas, pellets) y gaseoso (biogás, hidrógeno renovable). Por otra parte, los biocombustibles se pueden producir de biomasa comestibles (caña de azúcar, sorgo), no comestibles

(*Jatropha*, higuera), residuos (pajas, cascarillas), así como microorganismos (microalgas).

Todas las generaciones de materias primas se pueden emplear para producir cualquier tipo de biocombustible, mediante diferentes procesos de producción y con variados rendimientos. En particular, de las biomasa listadas anteriormente una fuente interesante son los residuos. Los residuos son aquellos materiales que ya no son de utilidad para el proceso que los generó, y usualmente representan problemas de contaminación por los elevados volúmenes en los que son generados. A diferencia de las biomasa comestibles (primera generación) no compiten con la alimentación humana, ni con tierras de cultivo como los de segunda generación; asimismo, la huella hídrica asociada con su obtención no es tan elevada como en el cultivo de las microalgas. Existen diferentes tipos de residuos, tales como forestales, agrícolas, sólidos municipales y los agroindustriales. En particular, dentro de los residuos agroindustriales se encuentran aquellos derivados del proceso de obtención del grano de café, los cuales son generados en elevados volúmenes debido a que el café como bebida es un producto que se consume en grandes cantidades. Estos residuos representan una merma y un problema de contaminación que impacta severamente a los pequeños y grandes productores; por lo que la revalorización de estos residuos para producción de biocombustibles es una alternativa interesante. Cabe mencionar que algunos de estos biocombustibles podrían ser usados en los procesos de producción del café, ayudando a lograr así su sostenibilidad energética. Por lo tanto, en este artículo se presentará información sobre el cultivo de café, así como los residuos derivados. Posteriormente se presentarán alternativas para la revalorización de los residuos de café, y el potencial estimado para la producción biocombustibles en México a partir de estos residuos.

2. El cultivo de café

El café es una bebida estimulante y aromática ampliamente consumida a nivel mundial. Esta bebida se produce a partir de los granos del café o cafeto, el cual es un importante cultivo de plantación perteneciente a la familia *Rubiaceae*, subfamilia *Cinchonoideae* y

tribu *Coffeae*. El cafeto se origina en las tierras de Abisinial, (actual Etiopía), y su popularidad llegaría tras la introducción de éste en Arabia; en particular, Yemen se convertiría en un importante centro de cultivo y distribución mundial, desde donde, aproximadamente en 1796, llegó a México por la región de Córdoba, Veracruz (Monaco y cols., 1977; Murthy y Naidu, 2012); cabe añadir que, en 1847, café proveniente de Guatemala ingresó a México por Chiapas (González Escalante, 2018). Los cafetos crecen en regiones tropicales, entre el trópico de Cáncer y Capricornio (también conocido como el cinturón de café); estas regiones se caracterizan por tener abundantes precipitaciones, así como una temperatura promedio anual de 21 °C sin heladas. Los cafetos crecen a altitudes que van desde 900 a 1600 metros sobre el nivel del mar, con una humedad ambiente recomendada en el rango de 65 a 90 % (Murthy y cols., 2001).

Una de las partes importantes del árbol de café es su fruto, al cual se le dice cereza, uva o capulín; cuando el fruto madura se torna rojo o amarillo, con dos semillas, Figura 1. La cereza se compone de la pulpa y el café pergamino; la pulpa está formada por el epicarpio, o cáscara, y representa el 46% del fruto, mientras que el café pergamino está constituido por el endocarpio, o pajilla, que constituye el 18-20%. Por otra parte, el mesocarpio, o mucílago miel, corresponde al 17.18%, el espermodermo, o película plateada, representa el 0.2%, mientras que el 17-18% es café verde.

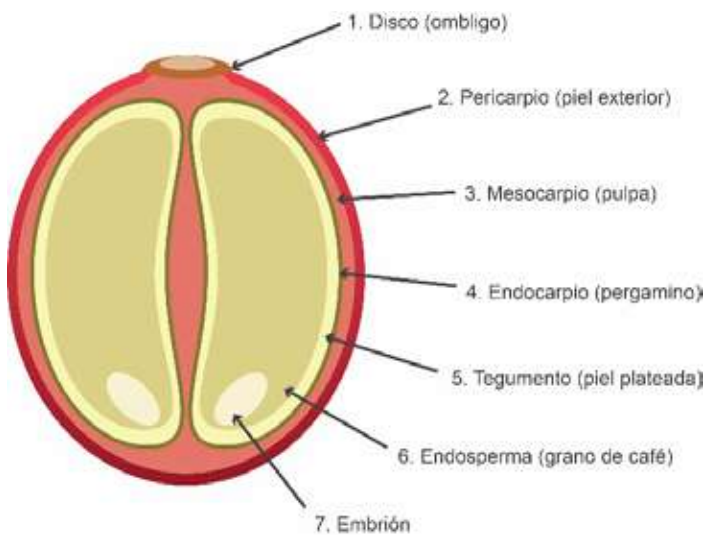


Figura 1. Partes del fruto del café

Por otro lado, las semillas o granos representan del 35.0 al 38.0% del fruto del café, y están constituidas por el endocarpio o pergamino, una película plateada o perisperma, endosperma cotiledón o embrión. El endospermo contiene muchos compuestos, entre los que destacan la cafeína, proteínas, aceites, azúcares, dextrina, celulosa, hemicelulosa, ácido clorogénico y minerales, entre otros. Por su parte, los granos de café contienen agua, minerales, sobre todo fosfatos y sulfatos de calcio, magnesio, potasio y sodio.

Dentro de las especies que se cultivan del café existen dos principales: el café arábica y café robusta, Figura 2.

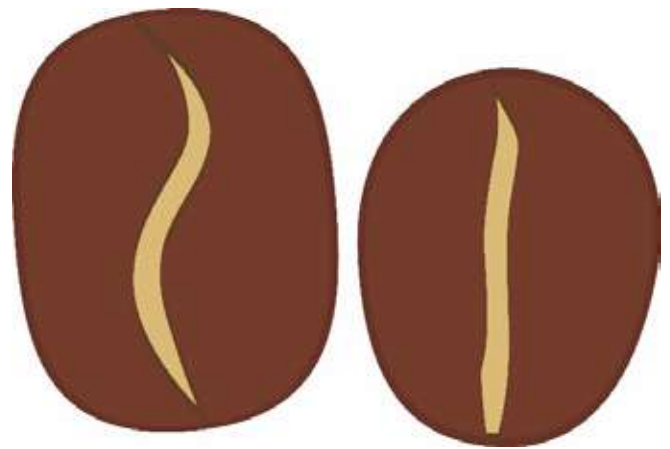


Figura 2. Granos de café arábica (izquierda) y café robusta (derecha)

El café arábica se caracteriza porque sus semillas cuentan con una forma alargada y delgada que aquellas de la especie robusta que son más pequeñas y gruesas. Además, el grano de café arábico contiene de 1.1 a 1.7% de cafeína, mientras que el de robusta contiene de 2 a 4.5% (Murthy y Naidu, 2012). Por otra parte, el sabor de la bebida de café producida de dichas especies tampoco es igual. El café arábico es más dulce y aromático, así como sensiblemente menos amargo y astringente que el experimentado con la especie robusta: la bebida obtenida de esta última es más fuerte y amarga. Por ello, el café proveniente de la especie arábica es considerado muy superior al obtenido de la especie robusta; razón por lo cual, la especie arábica es la más sembrada en todo el mundo, en México representa el 96% de la producción total (SAGARPA, 2017). Así, el cultivo del

café es una de las actividades más importantes dentro de la agricultura mexicana, tanto por el número de productores que intervienen, como por los ingresos derivados de su exportación. De acuerdo con la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA), en 2017 la producción de café empleaba a más de 500,000 productores de 14 entidades federativas y 480 municipios, siendo de los estados líderes Chiapas, Veracruz, Puebla, y Oaxaca. En la actualidad, la producción de café en México es realizada principalmente por pequeños productores, algunos de los cuales han adoptado nuevas prácticas tecnológicas que mejoran tanto sus procesos de producción como de comercialización. No obstante, la generación de subproductos o residuos es inevitable en la mayoría de los sectores industriales, y la industria cafetalera no es la excepción como se describe en la siguiente sección.

3. Los residuos del cultivo de café

En el cultivo de café se generan una gran cantidad de residuos durante el procesamiento de la fruta a la taza, aproximadamente 350 gramos de residuo por cada kilogramo de grano de café; dependiendo del método empleado para la obtención del grano de café, será el tipo de residuo liberado (Esquivel y col., 2012). Los dos métodos básicos para el procesamiento de café son el método húmedo y el método seco. El café procesado por el método húmedo, también se le llama café lavado o café pergamino. Este método consiste en eliminar la pulpa de la fruta que cubre las semillas/granos con una despulpadora antes de que se sequen (Murthy y cols., 2001; Murthy y Naidu, 2012). Por otro lado, el método seco se considera el más antiguo y simple; en este método, los frutos recién cosechados se secan y posteriormente se clasifican y ensacan. Si el procesamiento es realizado en seco, los principales residuos generados son la piel, la pulpa, el mucílago y cascarilla; todos estos residuos se agrupan en una misma fracción llamada cascara o cascabillo de café. Mientras que el procesamiento en húmedo permite la recuperación de la piel y la pulpa en una sola fracción, el mucílago y azúcares solubles en una segunda fracción, y la cascarilla en una tercera fracción. De los varios residuos del procesamiento del café,

la pulpa de café es el que se genera en mayor cantidad [43 % en procesado en húmedo] (Mussatto y cols., 2011). La cascarilla y la pulpa de café comprenden cerca del 45% de la cereza, y son los principales subproductos de la industria del café, Figura 3.

En los países productores de café, los desechos y subproductos constituyen una fuente de contaminación, que ocasiona un grave problema ambiental. En la mayoría de las fincas cafeteras existen unidades de procesamiento de café, en las cuales se realiza una disposición no adecuada de la pulpa, la cascarilla y los efluentes del café; lo anterior origina que se contamine el agua y la tierra alrededor de las unidades de procesamiento. Estos residuos contienen taninos, a



Figura 3. Residuos del cultivo de café

los que se le atribuye la baja biodegradabilidad y que incluso se les ha denominado agentes recalcitrantes; además de ser vistos como reductores de la calidad nutricional.

La pulpa de café es el principal residuo de los cultivos, representa el 29% del peso seco de la fruta entera, y su alto contenido de humedad hace que sea difícil su eliminación. Por otro lado, las cascarillas de la cereza del café representan alrededor del 12% de la fruta entera, y se compone de agua [15.0%], celulosa [24.5%], hemicelulosa [29.7%], lignina [23.7%] y cenizas [6.2%] (Gouvea y cols., 2009; Bekalo y Reinhardt, 2010).

En 2018 se produjeron 10,256,220 toneladas de café verde a nivel mundial, de las cuales cerca del 3 %

fue generado en México (ICO, 2019). Por otra parte, de acuerdo con la SAGARPA, por cada kilogramo de café se producen 350 g de residuos (SAGARPA, 2015). Por lo que, en México se generaron 107, 690.31 ton de residuos de esta industria en 2018. Considerando que los procesos de biodegradación de los residuos de café requieren tiempos muy largos y una gran demanda de oxígeno es claro que su incorporación directa en el ambiente representa un alto riesgo para la flora y fauna de esos ecosistemas. Al respecto, en México muy pocas o ninguna industria controla los residuos generados de la producción del café, y por lo tanto sigue siendo un problema de contaminación (Wong y cols., 2013). Por ello, se requiere de estrategias que posibiliten su revalorización, tópico que se discute en la siguiente sección.

4. Revalorización de los residuos de cultivo de café

La revalorización se define como el proceso mediante el cual los residuos se transforman en nuevos productos que pueden insertarse en el mercado; dichos productos pueden incluir productos de alto valor agregado, productos químicos, productos biotecnológicos, cosmetológicos, así como biocombustibles. Derivado de la revalorización es posible eliminar el residuo que genera el problema de contaminación, y al mismo tiempo mejorar la rentabilidad del proceso por la comercialización de los productos, o en el caso de los energéticos su uso dentro del proceso.

En los residuos del café, la pulpa de café y la cáscara sólo habían sido utilizados como fertilizante, alimento para el ganado, composta, así como adsorbente para la remoción de compuestos tóxicos para la manufactura de ácido giberélico; no obstante, en estas aplicaciones se emplea sólo una pequeña fracción de la cantidad disponible de residuos, ya que no son técnicamente muy eficientes. Por ello es necesario encontrar otros usos para este residuo sólido. A continuación, se presentan algunas alternativas de uso de los residuos y subproductos del café que se han reportado en la literatura.

Una de las alternativas considera la fermentación sólida de la pulpa de café utilizando

el hongo *Aspergillus niger*; como resultado de este proceso se disminuyen significativamente los niveles de polifenoles, fibra y cafeína de la pulpa, y se aumenta en 10% su contenido de proteína. Otra opción es la del ensilaje de la pulpa de café para ser utilizado como alimento de algunos animales de ganado lechero o de granja. Por otra parte, la pulpa puede ser empleada como abono orgánico, debido a su contenido de potasio, fósforo, calcio y otros micro minerales que ayudan al desarrollo de la fertilidad de los suelos. En la actualidad, el abono de la pulpa de café se utiliza en diversas plantaciones, preferentemente en las nuevas plantaciones de café. Recientemente se han realizado estudios sobre el uso de los subproductos del café para la producción de papel. Residuos del café como la piel y el residuo después de la preparación de la infusión son materiales ricos en celulosa y hemicelulosa; estos residuos podrían ser empleados para la producción de diversos tipos de papel (Wong y cols., 2013).

Otra opción es el uso de los residuos del café usado/gastado como adsorbente de bajo costo, y alta disponibilidad, para la eliminación de colorantes catiónicos en los tratamientos de aguas residuales. En 2009, Nakamura y cols. estudiaron la producción de carbones activados a partir del endocarpio del café; esta propuesta contribuye a reducir los residuos en la industria cafetera portuguesa creando un excedente económico.

Las aplicaciones mencionadas hasta ahora son muy interesantes. No obstante, la producción de energía partir de los residuos de café es una alternativa con gran potencial para contribuir a la sostenibilidad energética del sector. Adicionalmente, la producción de biocombustibles a partir de los residuos del café posicionaría a esta industria como cero residuos, y que coadyuva a la solución del problema del cambio climático. A continuación, se comentan algunos de los estudios realizados en esta temática.

En 2009, Machado estudió la producción de bioetanol a partir del café gastado. El café gastado fue sometido al proceso de hidrólisis ácida y el hidrolizado fue fermentado con *Saccharomyces cerevisiae*, obteniendo un rendimiento de 50.1%. Estos resultados confirman los reportados por Gouvea y cols. (2009), quienes indicaron que las cáscaras de café presentan

un excelente potencial para la producción de bioetanol.

Otra alternativa es la producción de bio-aceite y biocarbón a partir de la pirólisis de los residuos de la preparación de café (café gastado también conocido como posos de café); el bio-aceite es una mezcla compleja de compuestos orgánicos que contienen ácidos carboxílicos, ésteres, cetonas, fenoles y aromáticos. Los resultados muestran que el rendimiento del biocarbón se encuentra entre el 25-40 % en peso, y éste posee un valor calorífico de 31.9 MJ/kg (Tsai y cols., 2012). De acuerdo con sus resultados, el valor calorífico del biocarbón preparado a partir de los posos de café se encuentra en el límite superior del carbón (28-32 MJ/Kg) (Li y cols., 2014). Por otra parte, el bio-aceite puede emplearse como materia prima para producir biocombustibles para el sector transporte. Los estudios realizados indican que los rendimientos de bio-aceite a partir de procesos como la pirólisis y licuefacción hidrotérmica van desde 54 hasta 66% (Bok y cols. 2012; Li y cols. 2014; Kelkar y cols. 2015).

También se ha estudiado la extracción de aceite de los granos de café gastados para convertirlo en biodiésel. Usualmente, se logra extraer entre 10-15% de aceite de los granos gastados, dependiendo de la especie de café (Arábica o Robusta), y se obtiene una conversión del 100% en la reacción de transesterificación. Por lo que, se estima que pueden producirse 340 millones de galones de biodiésel a partir de los desechos de café producidos en todo el mundo. Otros autores reportan conversiones menores al 100%, pero aún competitivas, con valores de 85%, 86% y 96% (Kondamudi y cols., 2008; Calixto y cols., 2011; Al-Hamamre y cols., 2012; Vardon y cols., 2013; Caetano y cols., 2013).

Por otro lado, el agua drenada del extracto de la cereza del café es otra fuente potencial para la producción de biogás; el extracto de cereza que se recolecta y calienta, y se convertirá en una masa hirviente de microorganismos de todo tipo que trabajarán en los jugos de la fruta pegajosa desprendidos. Una fermentación apropiada y otros procedimientos permitirán reducir el pH, y el proceso de neutralización posterior da lugar a una espuma de CO₂; la evolución del CO₂ en este punto permite la posterior producción de biogás (Rathanivelu y Graziosi, 2005). El biogás producido puede quemarse para generar electricidad, y todo el calor residual puede utilizarse para secar el

café. Se ha informado del rendimiento del biogás oscila entre 0.500 y 0.598 m³/kg de materia orgánica seca, con una concentración de metano de entre el 55 y el 61% (Neves y cols., 2005; Neves y cols., 2006; Vitez y cols., 2016; Luz y cols., 2017; Giroto y cols., 2018).

Otra alternativa energética son los pellets combustibles, los cuales son biocombustibles densificados de biomasa pulverizada procedente de limpiezas forestales, industrias madereras, residuos agroindustriales y biomasa lignocelulósica. Para elaborar los pellets, los residuos deben ser triturados, y, posteriormente, son secados para finalmente ser prensados en forma de pequeños cilindros. El pellet se utiliza como biocombustible para generar energía eléctrica y/o calorífica de una manera limpia. Actualmente se han realizado estudios para la producción de pellets combustibles a partir de zacate, rastrojo de maíz, heno, residuos de jardinería, así como pajas de diferentes granos como cebada, arroz y de trigo (Pradhan y cols., 2018). Respecto a los residuos de café, se han hecho mezclas de éstos con desechos de madera de eucalipto, lo que ha dado origen a pellets de mayor durabilidad, dureza y densidad de energía neta. No obstante, no se ha estudiado la producción de pellets combustibles a partir de residuos de café, los cuales podrían usarse en el mismo proceso de producción de café, convirtiendo a esta industria en sostenible y de bajo impacto ambiental. Por ello que se requiere más investigación de cómo darle un uso a los desechos o subproductos generados de la industria del café.

5. Potencial de producción de pellets combustibles a partir de residuos de café

Como se mencionó anteriormente, de acuerdo con la Organización Internacional de Café, México en el año 2018 tuvo una producción de 261,060 toneladas de café verde (ICO, 2019); esto equivale a 859,992.30 toneladas de café cereza que se producen en 14 estados del país, en una superficie cosechada de 629,798.88 hectáreas (SIAP, 2019). En la Tabla 1 se muestran las toneladas producidas del cultivo de café cereza por cada estado mexicano; de acuerdo con la SAGARPA por cada kilogramo de café se producen 350 g de residuos (SAGARPA, 2015), por lo que con este coeficiente se pueden estimar los residuos generados a partir de la producción.

Tabla 1. Producción y residuos generados de café cereza en México en 2018

Estado	Superficie cosechada (ha)	Producción (Toneladas)	Residuos (Toneladas)	Participación nacional
Colima	2,675.17	3,255.78	1,139.52	0.38%
Chiapas	231,186.91	354,944.47	124,230.57	41.27%
Edo. México	507.56	526.13	184.15	0.06%
Guerrero	42,388.41	38,771.19	13,569.92	4.51%
Hidalgo	23,226.50	27,747.99	9,711.80	3.23%
Jalisco	3,483.80	4,553.76	1,593.82	0.53%
Morelos	25.70	35.65	12.48	0.004%
Nayarit	6,674.22	1,564.22	547.48	0.182%
Oaxaca	109,863.14	70,454.01	24,658.90	8.19%
Puebla	63,231.80	135,709.50	47,498.33	15.78%
Querétaro	199.00	25.47	8.92	0.003%
San Luis P.	16,783.00	12,218.10	4,276.34	1.421%
Tabasco	357.50	417.50	146.13	0.05%
Veracruz	129,196.17	209,768.53	73,418.99	24.39%
Total	629,798.88	859,992.30	300,997.35	100.00%

Como se observa en la Tabla 1 se genera una gran cantidad de residuos, los cuales se pueden revalorizar para la fabricación de pellets combustibles; dichos pellets se emplean como un biocombustible limpio para generación de energía calorífica y/o eléctrica. De acuerdo con el Atlas Nacional de Biomasa (ANBIO) de la Secretaría de Energía (SENER), se estima que el potencial energético de la biomasa residual industrial (rubro donde consideran a los residuos del café) es de 0.003837 TJ/ton (ANBIO,2013). Por lo que el potencial energético de los residuos se estima en 1155 TJ. Por lo que, los pellets combustibles de residuos de café en México permitirían generar 1,155.00 TJ (320.83 GWh); cabe mencionar que dicha cifra no considera pérdidas en el proceso de producción y que existe la infraestructura necesaria para el traslado de los residuos. De manera particular, en Chiapas, estado donde se concentra la mayor producción de residuos, la producción de pellets representaría el 10.90% de la energía eléctrica necesaria del estado. En Querétaro, que consume anualmente en promedio 4, 816.14 GWh, los pellets representarían un 6.67% de la energía requerida.

Considerado la distribución geográfica de los productores de café, en estados como Oaxaca y Chiapas por ejemplo, es importante señalar que en muchos de los casos no existe la infraestructura necesaria para el traslado de los residuos a los centros de producción. Por ende, se requiere realizar un estudio de la cadena de suministro que considere estos aspectos. No obstante, una solución podría ser el establecimiento de centros de producción de pellets para 3 o 5 comunidades que estén relativamente cercanas; dichos pellets podrían ser usados por los mismos productores para satisfacer las necesidades de energía térmica en sus hogares o inclusive en el proceso de secado de café.

6. Conclusiones

El café es uno de los productos más importantes a nivel mundial, lo cual se ha reflejado en el crecimiento sostenido de su producción global. Derivado de su proceso de producción se generan una gran cantidad de residuos, los cuales pueden revalorizarse para la generación de productos de valor agregado, así como

biocombustibles. En particular, la conversión de estos residuos en biocombustibles permitiría que la industria del café migrara hacia una economía circular con bajo impacto ambiental.

Agradecimientos

Se agradece el apoyo financiero proporcionado por CONACYT mediante la beca de manutención de L.A. Rodríguez Romero para la realización de sus estudios de posgrado.

Referencias Bibliográficas

- Al-Hamamre, Z., Foerster, S., Hartmann, F., Kröger, M., Kaltschmitt, M. [2012]. Oil extracted from spent coffee grounds as a renewable source for fatty acid methyl ester manufacturing. *Fuel* 96:70-76.
- ANBIO. [2013]. Atlas Nacional de Biomasa. Secretaría de Energía. <https://dgel.energia.gob.mx/ANBIO/index.html>
- Bekalo, S. A., Reinhardt, H. W. Fibers of coffee husk and hulls for the production of particleboard. *Materials and Structures*. [2010]. 43:1049-60.
- Bok, J.P., Choi, H.S., Choi, Y.S., Park, H.C., Kim, S.J. [2012]. Fast pyrolysis of coffee grounds: characteristics of product yields and biocrude oil quality. *Energy*. 47:17-24.
- Caetano, N.S., Silva, V.F.M., Melo, A.C., Mata, T.M. [2013]. Potential of spent coffee grounds for biodiesel production and other applications. *Chemical Engineering Transactions*. 35:1063-1068.
- Calixto, F., Fernandes, J., Couto, R., Hernandez, E.J., Najdanovic-Visaka, V., Simoes, P. C. [2011]. Synthesis of fatty acid methyl esters via direct transesterification with methanol/ carbondioxide mixtures from spent coffee grounds feedstock. *Green Chemical*. 13:1196-1202.
- Esquivel, P., Jiménez, V. M. [2012]. Functional properties of coffee and coffee by products. *Food Research International*. 46:488-495.
- Giroto F., Pivato A., Cossu R., Nkeng G.E., Lavagnolo M.C. [2018]. The broad spectrum of possibilities for spent coffee grounds valorisation. *J Mater Cycles Waste Manage*. 20:695-701.
- González Escalante T. [2018]. Los pequeños productores de café en Chiapas y el desarrollo de capacidades locales a partir del proceso de integración al comercio justo. Tesis de maestría. Tijuana, Baja California, México: El Colegio de la Frontera Norte.
- Gouvea B.M., Torres C., Franca A.S., Oliveira L.S., Oliveira E.S. Feasibility of ethanol production from coffee husks. *Biotechnology Letters*. [2009]. 31:1315-9.
- ICO. [2019]. International Coffee Organization. <http://www.ico.org/>
- IEA. [2020]. Sustainable Recovery, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/sustainable-recovery>
- IEA. International Energy Agency. [2019]. <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/oil>
- Kelkar, S., Saffron, C.M., Chai, L., Bovee, J., Stuecken, T.R., Garedew, M., Li, Z., Kriegel, R.M. [2015]. Pyrolysis of spent coffee grounds using a screw-conveyor reactor. *Fuel Process Technology*. 137:170-178.
- Li, X., Strezov, V., Kan, T. [2014]. Energy recovery potential analysis of spent coffee grounds pyrolysis products. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 110, 79-87.
- Luz F.C., Cordinera S., Manni A., Mulone V., Rocco V. [2017]. Anaerobic digestion of liquid fraction coffee grounds at laboratory scale: evaluation of the biogas yield. *Energy Procedia*. 105:1096-101.
- Machado, E.S.M. [2009]. Reaprovechamiento de residuos de la industria del café como materia prima para la producción de etanol. Tesis de maestría. Braga, Portugal: Departamento de Ingeniería Biológica, Universidad de Minho.
- Monaco, L.C., Sondahl, M.R., Carvalho, A., Crocomo, O.J., Sharp, W.R. [1977]. Applications of tissue cultures in the improvement of coffee. In: Reinert J, Bajaj YPS, editors. *Applied and fundamental aspects of plant cell tissue and organ culture*. Berlin: Springer-Verlag. p. 109-29.
- Murthy P.S., Basavaraj K., Naidu R. [2001]. Journey of Indian coffee quality. *Journal of Indian Coffee*. 3:18-21.
- Murthy, P. S., Naidu, M. M. [2012]. Sustainable management of coffee industry by-products and value addition- A review. *Resources, Conservation and Recycling*. 66:45-58.
- Mussatto, S. I., Machado, E. M. S., Martins, S., Teixeira,

- J. A. (2011). Production, Composition, and Application of Coffee and Its Industrial Residues. *Food Bioprocess Technology*. 4:661-672.
- Nakamura T., Hirata M., Kawasaki N., Tanada S., Tamuro T., Nakahori Y. (2009). Decolorization of indigo carmine by charcoal from extracted residue of coffee beans. *Journal of Environmental Science and Health Part A*. 3:555-62.
- Neves L., Oliveira R., Alves M.M. (2006). Anaerobic co-digestion of coffee waste and sewage sludge. *Waste Manage*. 26(2):176-81.
- Neves L., Ribeiro R., Oliveira R., Alves M.M. (2005). Anaerobic Digestion of Coffee waste in ADSW2005.
- Pradhan, P., Mahajani, S. M., Arora, A. (2018). Production and utilization of fuel pellets from biomass: A review. *Fuel Processing Technology*. 181:215-232.
- Rathanivelu R., Graziosi, G. (2005). Potential alternative use of coffee waste and by-products. *ICO. Proceedings*, ED 1967/05.
- SAGARPA. (2015). Plan de manejo de residuos generados en actividades agrícolas primera etapa: diagnóstico nacional. www.gob.mx/sagarpa
- SAGARPA. (2017). Planeación Agrícola Nacional 2017-2030. *Café Mexicano*. www.gob.mx/sagarpa
- SIA. (2018). Sistema de Información Energética. Secretaría de Energía. <http://sieenergia.gob.mx/bdiController.do?action=cuadro&subAction=applyOptions>
- SIAP. (2019). Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Estadística de Producción Agrícola. <http://infosiap.siap.gob.mx/gobmx/datosAbiertos.php>
- Tsai, W.-T., Liu, S.-C., Hsieh, C.-H. (2012). Preparation and fuel properties of biochars from the pyrolysis of exhausted coffee residue. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 93:63-67.
- Vardon, D.R., Moser, B.R., Zheng, W., Witkin, K., Evangelista, R.L., Strathmann, T.J., Rajagopalan, K., Sharma, B.K. (2013). Complete utilization of spent Coffee grounds to produce biodiesel, bio-oil, and biochar. *ACS Sustain. Chem. Eng*. 1:1286-1294.
- Vítez T., Koutny T., Sotnar M., Chovanec J. (2016). On the spent coffee grounds biogas production. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*. 64(4):1279-82.
- Wong Paz, Jorge E.; Guyot, Sylvain; Rodríguez Herrera, Raúl; Gutiérrez Sánchez, Gerardo; Contreras Esquivel, Juan C.; Saucedo Castañeda, Gerardo; Aguilar, Cristóbal N. (2013). Alternativas Actuales para el Manejo Sustentable de los Residuos de la Industria del Café en México. *Revista Científica de la Universidad Autónoma de Coahuila. Acta Química Mexicana (AQM)*. Volumen 5, No 10.

