Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riiit.com.mx

Residuos agrícolas y agroindustriales biosecados como alternativa energética

Biodried agricultural and agroindustrial waste as an energy alternative

Ballesteros-Vásquez, L.C.[1], Robles-Martínez, F.[1], Contreras-Cisneros, R.M.[1], Piña-Guzmán, A.B.[1], Osorio-Mirón, A.[2]

[1] Unidad Profesional Interdisciplinaria de Biotecnología del Instituto Politécnico Nacional IPN, Av. Acueducto S/N, Barrio la Laguna-Ticomán, Delegación Gustavo A. Madero, Ciudad de México, C. P. 07340, MÉXICO. Tel: 57296000 ext. 56470.
[2] Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Veracruzana, Prolongación Oriente 6 No. 1009, Col. Rafael Alvarado, Orizaba, Veracruz, C. P. 94340, MÉXICO. Tel: (+52) 272 724 0120.
ingenieroambiental.ballesteros@hotmail.com; froblesm@ipn.mx; larry5584@hotmail.com; apinag@ipn.mx; anosorio@uv.mx

Innovación Tecnológica: Aplicación del biosecado para facilitar el aprovechamiento de la biomasa como alternativa energética.

Área de aplicación industrial: Energía, servicios auxiliares, generación de vapor y electricidad.

Recibido:09 septiembre 2021
Aceptado: 19 mayo 2022

Abstract

Biodrying is an aerobic process whose purpose is the elimination of free water from waste, taking advantage of the metabolic heat generated by microorganisms which partially degrade organic matter. This process is applied in some countries of Europe prior to the incineration of municipal solid waste to reduce the humidity of these. In this study, the generation of agroindustrial and agricultural waste in Mexico was analyzed based on the 25 most important agricultural crops in the country. During the production, processing and consumption of these agricultural products, organic waste (OW) is generated, which could be used as an alternative fuel after submitting it to the biodrying process. The national food production of these crops amounts to a total of 162,428,751 t/year, distributed in the 32 states, in this way it was identified which OWs are more susceptible to being biodried. The generation of these wastes was estimated according to the production indices

and their potential for using and application in the generation of a biofuel with calorific power (CP) similar to that of commercial firewood was analyzed (16,676.05 kJ/kg). The CP of the biodried and analyzed organic waste is in a range of 14,226 to 25,659 kJ / kg, many of them in accordance with the typical values of CP reported for crushed wood waste (19,000-20,000 kJ/kg). These results show that the reduction in initial humidity and the increase in CP of the OWs that undergo biodrying make them susceptible to competing in the energy sector with conventional fuels.

Keywords: Bioenergy, Biofuel, Alternative fuels, Biodrying.

Resumen

El biosecado es un proceso aerobio cuyo fin es la eliminación del agua libre de los residuos que aprovecha el calor metabólico generado por los microorganismos que degradan parcialmente la materia orgánica. Este proceso se aplica en algunos países de Europa previo a la incineración de los residuos sólidos urbanos para disminuir la humedad de estos. En el presente estudio se analizó la generación de residuos agrícolas y agroindustriales en México con base en los 25 cultivos agrícolas más importantes del país. Durante la producción, procesamiento y consumo de estos productos agrícolas, se generan residuos sólidos orgánicos (RSO), que podrían ser utilizados como combustible alterno después de someterlos a un proceso de biosecado. La producción nacional alimentaria de estos cultivos asciende a un total de 162,428,751 t/año, distribuidos en las 32 entidades federativas, de esta forma se identificó cuáles RSO son más susceptibles para ser biosecados. La generación de estos residuos se estimó de acuerdo con los índices de producción y se analizó su potencial para el uso y aplicación en la generación de un combustible con poder calorífico (PC) similar al de la leña comercial (16,676.05 kJ/kg). El PC de los residuos orgánicos biosecados y analizados está en un rango de 14,226 a 25,659 kJ/kg, muchos de ellos acorde con los valores típicos de PC reportados para residuos maderables triturados (19,000-20,000 kJ/kg). Estos resultados muestran que la reducción de humedad inicial y el incremento de PC de los RSO que se someten a biosecado los hace susceptibles de llegar a competir en el sector energético con los combustibles convencionales.

Palabras clave: Bioenergía, Biocombustible, Combustibles alternos, Biosecado.

I. Introducción

La producción agrícola y pecuaria a nivel nacional en el año 2019, según SAGARPA y SIAP, fue de 287.7 millones de toneladas. Al sector agrícola corresponden 262.5 millones de toneladas (91.2%), en donde se incluyen cultivos tales como caña de azúcar, naranja, maíz, trigo, frijol y sorgo, entre otros[1-4]. Lo anterior supone una generación de residuos sólidos orgánicos (RSO), en cantidades que derivan en una problemática no solo ambiental, sino también económica, política y social. Así que, el manejo, tratamiento y disposición de estos residuos es necesario para mitigar o reducir el impacto asociado a la generación de residuos, en este sector productivo. En este contexto, es imperante el desarrollo de tecnologías que permitan generar energía a partir de biomasa, esto puede incluir un rango amplio de productos.

Este tipo de bioenergía se ha dividido en tres clasificaciones generales de combustibles: líquidos, gaseosos y sólidos; estos últimos derivados a partir de leña, carbón, residuos agrícolas, pecuarios y municipales, así como residuos agroindustriales, que mediante su incineración son utilizados para producir calor y electricidad[5-6]. Una propuesta viable es el uso del biosecado, ya que permite tratar y valorizar los residuos agrícolas y agroindustriales para obtener como producto final, un material seco que pueda utilizarse como biocombustible sólido. Este bioproceso ha tomado relevancia las últimas dos décadas, por el valor energético del material procesado. Países como Turquía, Italia, Polonia, España, China, India y Suiza, han realizado investigación para utilizar el biosecado como proceso para la reducción de volumen y masa de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) y el uso del material biosecado resultante como combustible de alto PC[7-11]. Otros países como Canadá, Chile y China han realizado investigación para aplicar el biosecado como proceso de estabilización en lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) previo a su disposición final[12-13]. La investigación acerca del biosecado se ha realizado en pilas semi estáticas, pilas con aireación forzada y múltiples tipos de reactores, con residuos de origen diverso, tales como residuos sólidos urbanos (RSU), residuos sólidos orgánicos (RSO), y lodos de PTAR[13-17]. Sin embargo, hoy en día la aplicación de este bioproceso no ha sido implementada sistemáticamente en la valorización a gran escala de residuos generados en el sector agrícola o agroindustrial.

El biosecado es un proceso aerobio que consiste en la eliminación del agua libre en los residuos orgánicos, el cual aprovecha el calor metabólico generado a partir de la biodegradación parcial microbiológica de la materia orgánica[18] y al mismo tiempo permite estabilizar la materia biodegradable para obtener un combustible generado a partir de un biorresiduo. La Figura 1 muestra el interior de una planta de biosecado de RSU ubicada en la región de Castellón (España).



Figura 1. Planta de biosecado: a) fosa de recepción de residuos, b) depósito de residuos triturados y c) área de biosecado.

El objetivo principal del biosecado es bajar el contenido de agua para obtener un producto que sea homogéneo, estable y útil[19] y por lo tanto también será más eficiente al momento de utilizarlo en combustión directa, ya que el potencial calorífico del material es inversamente proporcional a su contenido de humedad.

Al eliminar, mediante biosecado, parte de la humedad y estabilizar la biomasa, también se obtiene la reducción de peso y volumen de los residuos[19-20], en donde la reducción de humedad representa la mayor parte de la pérdida de peso[18]. Así mismo, por su estabilización biológica, los residuos biosecados presentan ventajas adicionales, en cuanto a manejo y almacenamiento, con respecto a los residuos frescos, al obtenerse al final del proceso un material parcialmente seco y estable, atractivo para su combustión directa[9], lo que permite una recuperación energética comparable con el carbón vegetal para el caso de algunos residuos agroindustriales o agrícolas[18].

La posible recuperación energética que se puede lograr con la utilización del material biosecado puede ser una ventaja competitiva en el mercado de los combustibles sólidos, puesto que el uso de la biomasa agrícola o agroindustrial residual para fines energéticos puede traer un impacto ambiental menor que el que ocasionarían los mismos residuos sin tratamiento en los sitios de disposición final (generalmente en el sector agrícola se recurre a la quema de materia orgánica en campo y en pocos casos, la agroindustria recurre a una adecuada disposición final de sus residuos[21-22]). Es importante analizar la situación de los sectores agrícola y agroindustrial, puesto que los residuos orgánicos generados pueden ser una vía útil y económicamente viable si se aprovechan como material de combustión en vez de ser solo desechados en campo o en sitios de disposición final (SDF) de residuos, en donde por biodegradación anaerobia generarán emisiones nocivas para el ambiente y las poblaciones cercanas (en caso de las emisiones de metano y compuestos orgánicos volátiles y ácido sulfhídrico).

El acopio de residuos orgánicos es una de las principales dificultades a las cuales se puede enfrentar la implementación a gran escala de este bioproceso, sin embargo, en lugares como las centrales de abasto se desechan grandes cantidades de alimentos en mal estado o no aptos para su comercialización, que se pueden aprovechar. Ospina Machado y Villamizar (2003)[23] reportan que en Colombia una central de abasto puede llegar a generar en promedio 2,282 toneladas de RO al mes de alimentos que no son comercializados por deterioro de la calidad y apariencia del producto (condiciones de maltrato, marchitez o deshidratación). Por su parte, Robles Martínez *et al.*, (2003)[24], indican que en México existen más de 60 centrales de abasto en donde, en la mayoría de los casos, los RO que se generan no se someten a ningún tipo de tratamiento lo cual ocasiona problemas ambientales que se dan por la degradación anaerobia en los SDF[27]. El caso de la generación de este tipo de residuos es crítico en la Ciudad de México (CdMx), especialmente en la Central de Abasto de esta ciudad (CEDA) por la cantidad diaria de residuos que se genera (557 toneladas), de los cuales cerca de 14.25% son productos comestibles (SEDEMA, 2020)[28], lo que representa 2381 toneladas al mes de RO, muy próximo al reportado por Ospina Machado y Villamizar (2003)[23].

Antes del cierre del relleno sanitario de Bordo Poniente (diciembre del 2011), la mayoría de RO que se generaban en la CEDA se depositaron en dicho relleno sanitario sin tratamiento, ni valorización alguna[24]; los principales productos desechados fueron tomate, mango, plátano, papaya, naranja, piña, fresas, entre otros, los cuales presentan alto contenido de humedad. Al tener en cuenta esta información se puede proponer el

biosecado como método para el tratamiento de los residuos orgánicos de las centrales de abasto, principalmente al tener localizados gran cantidad de residuos en un solo sitio, y de esta manera lograr una valorización de desechos de alimentos que se considera perdidos.

Lo mismo sucede con la generación de muchos residuos agroindustriales, debido a la oportunidad de encontrar "la materia prima" en grandes cantidades para el proceso de biosecado, por ejemplo, el caso del bagazo de la caña en los ingenios azucareros, el bagazo del agave en la industria tequilera o la cebada en el caso de la industria cervecera, entre otros.

La presenta investigación se desarrolló en dos etapas, se realizó primeramente una investigación bibliográfica que nos permitió tener información de los 25 cultivos agrícolas más importantes de la República Mexicana. Posteriormente se determinó en laboratorio el PC de los residuos orgánicos que se generan al momento de cosechar y/o procesar estos 25 cultivos. Con esta información se puede determinar qué materiales son aptos para biosecar y así poder obtener un biocombustible con alta probabilidad de satisfacer (por lo menos parcialmente) las necesidades energéticas del mismo sector agroindustrial como sucede actualmente en los ingenios azucareros, donde el bagazo de caña es una fuente de energía importante para esta agroindustria.

II. Materiales y Métodos

Se realizó una búsqueda de información en las publicaciones oficiales de SAGARPA, SIAP y el Gobierno Mexicano en cuanto a los volúmenes de producción agrícola a nivel nacional. Se encontró información de 748 productos agrícolas, de los cuales, 64 tipos de cultivos cuentan con un seguimiento gubernamental mensual y contribuyen con el 94% del valor de la producción agroalimentaria en México.

Resultado de esta consulta bibliográfica, se elaboró una lista de los principales 25 cultivos de acuerdo con la cantidad de superficie sembrada, superficie cosechada y volumen de producción anual; adicional a esto, se identificaron las 10 entidades federativas en donde más se producen estos cultivos y se buscaron índices de generación de residuos orgánicos para cada uno de estos cultivos. Con todo lo anterior, se buscó analizar el panorama nacional en cuanto a la generación de residuos y así determinar el PC de los residuos orgánicos susceptibles de utilizarse como combustible alterno.

Para la determinación del poder calorífico (PC), primeramente se midió la humedad de estos residuos por el método gravimétrico conforme a lo establecido en la NOM-021-SEMARNAT-2000. Una vez determinada la humedad para cada residuo analizado, se determinó el PC de acuerdo con lo expresado en la norma NMX-AA-33-1985, el cálculo realizado corresponde al poder calorífico inferior o neto PCI, el cual se aborda en el punto 8.3 de dicha norma. Este parámetro se determinó en una bomba calorimétrica marca PARR (serie 1341EB). Se utilizaron tres controles a los cuales se les midió el PC, dos comerciales (leña comercial con un PC de 16,676.05 kJ/kg y carbón vegetal comercial con PC de 30,637.05 kJ/kg) y material biosecado (con PC promedio de 15,550 kJ/kg), obtenido de una pila experimental reportada por Ballesteros Vásquez (2019)[29]. Cabe señalar que la composición inicial de esta pila experimental del material biosecado fue: 79.8% de cáscaras de naranja, 16.7% bagazo de caña y 3.5% de mulch.

Se buscó información en el año 2019 de los volúmenes totales de producción de los 25 cultivos agrícolas más importantes en México, posteriormente se identificaron los

residuos más importantes que se generan durante la cosecha o después de algún proceso agroindustrial de los principales cultivos, mostrados en la Tabla 1.

Una vez identificados los residuos generados, se determinó el PC. En la Tabla 2 se resumen las determinaciones del PC en base seca de los residuos orgánicos agroindustriales generados de los 25 cultivos agrícolas. Se determinó el PC de los residuos antes y después del proceso de biosecado, es decir, con la humedad inicial de los residuos y cuando los residuos tienen 10% de humedad final (comparable con la humedad que puede alcanzarse en el material biosecado utilizado para fines de comparación en el presente trabajo), en ambos casos se considera el calor sensible y latente necesario para elevar la temperatura y posteriormente evaporar la masa de agua presente en los residuos.

III. Discusión y Resultados

La cáscara de aguacate fue el residuo que presentó un mayor PC (22,302.72 $kJ \cdot kg^{-1}$), como se observa en la Tabla 2, seguido de residuos como la cáscara dura de coco (con un PC de 19,035 $kJ \cdot kg^{-1}$ con 10% de humedad), a su vez el residuo de la cáscara blanda del mismo alimento presentó un PC semejante (17,240.71 $kJ \cdot kg^{-1}$). Los residuos de coco por su estructura, forma, baja humedad inicial y tamaño son bastante atrayentes como material estructurante en un proceso de biosecado, ya que por sus características puede propiciar mejores condiciones para el intercambio de gases en las pilas semi estáticas de biosecado. Esto quiere decir que la cáscara dura de coco puede ser muy atractiva no solo por su PC sino también por favorecer buenas condiciones de aireación al momento de someter mezclas de residuos orgánicos al proceso de biosecado.

Tabla 1. Listado los 25 cultivos agrícolas más importantes en México organizados por volumen de producción anual.

CULTIVO	SUPERFICIE SEMBRADA	SUPERFICIE COSECHADA	VOLUMEN (TON)
Caña de azúcar	848,964.26	781,054.34	56,446,822.25
Maíz grano	7,761,216.74	7,598,086.44	28,250,782.31
Alfalfa verde	387,155.33	386,607.33	23,263,936.99
Maíz forrajero en verde	607,398.40	601,663.90	16,164,603.31
Avena forrajera en verde	690,203.50	686,632.67	10,476,491.48
Sorgo grano	1,534,382.08	1,513,015.41	5,005,837.77
Naranja	335,335.69	314,587.87	4,603,253.74
Trigo grano	729,121.23	723,559.43	3,862,913.61
Tomate rojo (jitomate)	51,861.10	51,299.14	3,349,154.71
Sorgo forrajero en verde	169,142.22	168,743.18	3,037,307.10
Chile verde	173,146.15	170,135.12	2,737,028.16
Limón	180,601.98	161,915.61	2,415,869.38
Plátano	80,021.99	78,322.04	2,384,777.57
Aguacate	205,250.42	180,536.43	1,889,353.60
Mango	193,342.65	184,892.15	1,888,186.67
Agave	111,420.03	21,892.01	1,875,931.43
Papa	64,465.55	64,342.05	1,796,814.15
Cebolla	52,499.97	51,504.47	1,635,049.24

Semilla de caña de azúcar	23,966.41	23,235.34	1,603,562.78
Sandía	40,047.13	38,671.65	1,199,647.87
Frijol	1,632,150.47	1,575,988.89	1,088,766.79
Cebada grano	334,270.30	329,745.30	978,348.57
Elote	70,874.84	70,283.05	898,792.74
Piña	42,801.68	19,489.40	875,839.55
Caña de azúcar otro uso	16,346.05	16,159.55	451,477.50

Fuente: Elaboración propia. Datos a 2016[25-26].

Tabla 2. Poder calorífico (PC) de residuos orgánicos agroindustriales.

Producto	Residuos	Humedad inicial	PC inicial	PC posterior al biosecado	Incremento PC a Humedad final
		%	$kJ \cdot kg^{-1}$	$kJ \cdot kg^{-1}$	$kJ \cdot kg^{-1}$
Alfalfa	Alfalfa	82.59	1,533.41	16,790.70	15,257.28
Aguacate	Cáscara	70.94	5,964.61	22,302.72	16,338.11
	Semilla	53.85	7,401.35	15,751.42	8,350.06
Avena	Forrajera	85.16	563.64	14,516.77	13,953.13
	Cascarilla	50.12	7,640.56	14,824.06	7,183.50
Plátano	Cáscara	88.68	-227.67	14,044.47	14,272.14
	Completo	81.11	1,226.91	13,699.22	12,472.30
	Fruto	77.76	1,884.84	13,720.23	11,835.39
Caña de Azúcar	Bagazo	63.57	5,102.40	15,010.05	9,907.66
Cebada	Cáscara	49.20	8,597.38	16,208.38	7,611.00
Cebolla	Cebolla	91.48	-845.65	13,584.71	14,430.35
Chile	Rajas	91.30	-548.47	16,275.07	16,823.54
	Semilla	82.13	2,306.18	20,138.76	17,832.57
	Palito / Estilo	81.99	1,439.14	15,627.29	14,188.14
Coco	Cáscara Blanda	50.67	8,861.39	17,240.71	8,379.33
	Cáscara Dura	21.51	16,529.20	19,035.41	2,506.21
Fríjol	Vaina	76.57	2,267.40	14,304.79	12,037.40
Limón	Cáscara	78.52	1,996.79	14,807.09	12,810.31
Mandarina	Tallo y Hoja	54.00	6,971.50	14,969.28	7,997.78
	Cáscara	69.98	3,476.85	14,021.38	10,544.53
Mango	Semilla	65.88	5,228.45	16,566.96	11,338.52
	Pulpa residuo	79.12	1,259.63	12,168.05	10,908.42
	Cáscara	79.74	2,235.56	16,994.60	14,759.04
Maíz	Maíz Hoja	69.38	3,818.62	14,685.99	10,867.37
	Pelo de Elote	86.49	457.89	15,649.41	15,191.52
	Olote	77.29	2,613.14	16,246.67	13,633.54
Naranja	Cáscara	75.36	2,783.72	15,309.18	12,525.46

Papa	Cáscara	86.01	432.03	14,807.17	14,375.14
Piña	Hoja	87.68	-60.23	13,786.71	13,846.94
	Cáscara	86.00	253.78	13,643.25	13,389.46
Sandia	Cáscara	93.75	-1,422.25	11,836.96	13,259.21
Tomate	Tomate	94.35	-1,422.55	13,592.01	15,014.56

Los residuos de la pulpa de mango (PC 12,168 kJ·kg^{-1}) y de la cáscara de sandía (PC 11,836 kJ·kg^{-1}) presentaron los PC más bajos respecto a los controles experimentales (leña comercial, carbón vegetal y material biosecado). Adicional a esto, los valores típicos reportados de PC por Valter y Luca (2008)[30] para residuos maderables triturados (19,000-20,000 kJ·kg^{-1}) se relacionan con los obtenidos en las pruebas de calorimetría realizadas en la presente investigación a residuos como la cáscara dura de coco (19,035 kJ·kg^{-1}), la semilla del aguacate (15,751 kJ·kg^{-1}), el bagazo de la caña de azúcar (15,010 kJ·kg^{-1}), los residuos de la cáscara de limón (14,807 kJ·kg^{-1}), el tallo y hoja de la mandarina (14,969 kJ·kg^{-1}), la semilla del mango (16,566 kJ·kg^{-1}), el olote de maíz (16,246 kJ·kg^{-1}), entre otros. Los cuales presentan un mayor PC con respecto a un combustible convencional (leña) con un porcentaje de humedad al 20% (14,400 kJ·kg^{-1})[30].

El obtener valores negativos de PC inicial en los residuos de la cáscara de plátano, cebolla, tomate, rajas de chile, las hojas de piña y la cáscara de sandía, indica que la cantidad de agua presente es elevada, por lo que no es recomendable llevar estos residuos a un proceso de combustión con un aprovechamiento de energía útil. Para evaporar el agua presente en este tipo de residuos se requiere aplicar mayor energía que en otros residuos. Además, la cantidad de sólidos presente es mínima, ya que el contenido de agua es mayor al 88%. Esto, sumado a las dificultades que supone reunir grandes cantidades de este tipo de residuos, no los hace realmente atractivos para la implementación de una posible generación de biocombustibles; no obstante, el biosecado se caracteriza por ser una técnica versátil, donde es conveniente realizar mezclas de residuos orgánicos para mejorar las características del producto final (material biosecado).

Muchos residuos agrícolas y agroindustriales pueden ser utilizados en procesos de biosecado para lograr mejoras importantes en el poder de combustión en los residuos analizados, al obtenerse rangos de poder de combustión de 11,836 kJ·kg^{-1} (cáscara de sandía) hasta 22,302 kJ·kg^{-1} (cáscara de aguacate) con 10% de humedad en ambos residuos. Autores como Robles Martínez *et al*. (2013)[18] han reportado rangos de 16,252 kJ·kg^{-1}–17,139 kJ·kg^{-1} en el calor de combustión generado por material biosecado obtenido mediante pilas semi estáticas compuestas por mezclas de residuos orgánicos (cáscara de naranja 54.9%, mezcla de frutas 16.7% y mezcla de verduras 16.4%), resultados muy cercanos a los obtenidos para los residuos agroindustriales como la caña de azúcar, mandarina, naranja, piña, maíz, papa y limón analizados en el presente trabajo con el 10% de humedad. Otros reportes relacionados con el poder de combustión reportan rangos de 10,531-14,056[31] kJ·kg^{-1}; 10,300[8] kJ·kg^{-1} y 6,964.8-15,688[32] kJ·kg^{-1}, respectivamente, en el material biosecado obtenidos a partir de RSU y mezclas de residuos de poda; los PC reportados por estos autores se encuentran por debajo del PC obtenido para la mayoría de los residuos analizados en el presente trabajo. Las diferencias en los datos de calor de

combustión se pueden atribuir al tipo de residuos sólidos que han sido utilizados por cada autor, a las condiciones del proceso de biosecado como la duración de la fase termofílica, y al contenido de humedad con que inició y finalizó cada estudio.

Para evaluar el porcentaje de incremento del PC de los residuos sometidos al biosecado (con 10% de humedad), se calculó el PC de estos residuos antes del proceso (considerando su humedad inicial). Para realizar esta estimación fue necesario calcular la cantidad de energía necesaria para elevar la temperatura del agua presente en los residuos sometidos al proceso y mediante la entalpía de evaporación del agua a 1 atm, la cual indica que la energía que se necesita para evaporar 1g de agua son 540 cal, se determinó la cantidad de energía necesaria para evaporar el agua inicial que tienen los residuos empleados antes del bioproceso y con esto se logró conocer el aporte calórico inicial de los residuos antes de biosecarlos, para poder realizar una comparación con el PC de los residuos biosecados y calcular el aumento en el PC después del bioproceso. Por lo tanto, si se busca aprovechar el PC de un residuo con alto porcentaje de humedad, habrá que considerar que será necesario utilizar energía para evaporar el agua presente. Los mejores resultados en cuanto al incremento del PC, se lograron en los residuos orgánicos con mayor humedad inicial. Por ejemplo, los residuos de tomate, sandía, cebolla y rajas de chile (94.3%, 93.7%, 91.4% y 91.3% de humedad inicial, respectivamente), obtuvieron un incremento en el PC en un rango de 13,259 $kJ \cdot kg^{-1}$ a 16,823 $kJ \cdot kg^{-1}$. No obstante, el obtener altos incrementos en el PC debido a la reducción de humedad, se ve afectado por una baja producción de material biosecado final, ya que, como los residuos cuentan con un alto contenido de agua, la cantidad de biomasa seca resultante al final del proceso es mínima. Por el contrario, el material que presentó menor incremento en el PC después del proceso de biosecado fue la cáscara dura de coco (15.16% correspondiente a 2,506 $kJ \cdot kg^{-1}$), con una humedad inicial de 21.5%, seguido por la cascarilla de cebada, de avena y de la cáscara de coco blanda, estos residuos tuvieron un incremento en el PC en un rango de 7,183 $kJ \cdot kg^{-1}$ a 8,379 $kJ \cdot kg^{-1}$ con humedad inicial cercana a 50%, por lo cual, este tipo de residuos podrían funcionar más en el proceso como materiales estructurantes, ya que aportarían soporte y favorecerían la porosidad, similar al que se podría lograr con los residuos de las hojas y tallo de la mandarina (55% de humedad inicial e incremento de 7,997 $kJ \cdot kg^{-1}$ en el PC) y el bagazo de caña de azúcar (63.57% de humedad e incremento de 9,907 $kJ \cdot kg^{-1}$ en su PC). Además, con el uso de estos materiales estructurantes, el PC de la mezcla final aumentará, debido a que, en el caso de las cáscaras de coco, estos residuos presentaron un PC alto.

La puesta en marcha del biosecado en el sector agroalimentario tiene varias oportunidades de implementación y variará de acuerdo con los tipos y características de cada residuo. Al lograr vincular a los grandes generadores de RSO del sector agroalimentario con estrategias que permitan la sinergia corporativa entre varias industrias se lograría una valorización de la biomasa que puede satisfacer necesidades energéticas y a la par dar una correcta gestión a los residuos, lo que se traduce en una reducción del impacto ambiental asociado a la generación de residuos.

El hecho de que la mayoría de los RSO analizados en el presente trabajo cuenten con un PC similar al del material biosecado (compuesto por residuos de naranja, mulch y bagazo de caña de azúcar) cuando estos se encuentran con 10% de humedad y aunado a esto, si se considera que el cálculo para determinar el incremento del PC de cada

residuo se haya basado en este mismo porcentaje (10% de humedad), permite pensar en el biosecado como un proceso potencial para generar un biocombustible sólido; sin embargo, estos valores de mejora dependerán tanto de las características propias de cada residuo (contenido de azúcares y lípidos) como de la humedad inicial de los mismos. Así entonces, el proceso de biosecado puede tener ciertas ventajas comparativas aplicables en las agroindustrias, adicionales al aprovechamiento energético, como la reducción de masa y volumen para residuos con elevada humedad, esto se puede traducir en una reducción de costos en fases de gestión de residuos (transporte y almacenamiento), dato de interés para México debido a los volúmenes de producción de estos cultivos, que se muestran en la Tabla 1.

De acuerdo con la Tabla 2 se puede ver como los RSO de diferentes agroindustrias tienen un alto PC (como es el caso de las cáscaras de coco, piña, cítricos, entre otros) que pueden llegar a ser utilizados como combustibles alternos para dar una solución a dos problemáticas: (1) la gestión inadecuada de residuos agroindustriales y (2) la crisis energética actual y la dependencia de los combustibles fósiles con las consecuencias ambientales asociadas a las fases de exploración, extracción y quema de los mismos. Con lo discutido en el presente trabajo, se puede pensar en la posibilidad de encaminar a las agroindustrias hacia una economía circular a través del tratamiento de sus propios residuos mediante el biosecado y la generación de un combustible que puedan aprovechar en su propia industria y de esta forma cubrir ambas problemáticas expuestas anteriormente. Adicionalmente, los beneficios de la aplicación de este bioproceso en el sector agrícola y agroindustrial serían: el aumento de la vida útil de los rellenos sanitarios, disminución de la contaminación ambiental y la optimización de recursos. Por lo anterior, es necesario revisar la viabilidad técnica que permita la correcta gestión de los residuos orgánicos con la técnica de biosecado desde su fase de generación, transporte, almacenamiento y uso final que permita someter residuos agrícolas y agroindustriales bajo esta metodología de aprovechamiento, dirigido a los dos grandes tipos de mercado a los que se dedican los productores agroalimentarios para la comercialización local (generalmente del alimento en fresco) y a gran escala.

La diversidad de los residuos analizados permite realizar mezclas de estos para someterlos al bioproceso, lo que mejoraría las condiciones físicas, bioquímicas y microbiológicas del proceso de biosecado (porosidad, porcentaje de oxígeno, intercambio gaseoso, eliminación de humedad y mayor diversidad microbiológica). Es así como este proceso se puede implementar durante todo el año, una vez realizada la selección de residuos en función del producto final que se quiera obtener o en función de la mitigación del impacto de los residuos que se generen en el lugar de aplicación.

La figura 2 muestra la ganancia de calor de combustión en una mezcla de residuos de cáscara de naranja y madera triturada, compara gráficamente los resultados experimentales obtenidos con los controles utilizados (leña comercial y carbón vegetal y el material biosecado de las pilas P1 y P2). El PC inicial de P1 y P2 se determinaron a una humedad del material de 75.0% y 88.3% respectivamente, por lo que el valor inicial del PC en P2 resulta en un valor negativo debido a la energía necesaria para evaporar la humedad contenida en la mezcla de residuos sometidas al bioproceso, efecto mencionado en párrafos anteriores. Con relación a la determinación de PC final, se calculó a una humedad final en las mezclas de residuos

agroindustriales de 14.4% para P1 y 11.9% para P2.

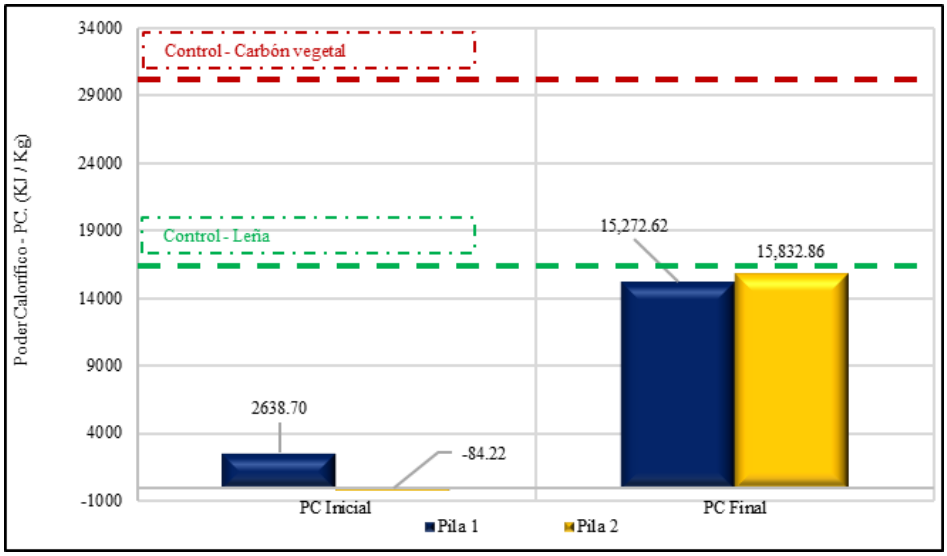


Figura 2. Incremento y comparación del calor de combustión de residuos agroindustriales después de someterlos al biosecado.

Al analizar la generación de residuos orgánicos de los principales cultivos y los residuos generados en la agroindustria, que desarrolla sus actividades productivas a partir del procesamiento de los alimentos, se observa que los residuos orgánicos no presentan las mismas características físicas y químicas (tales como tamaño, textura, composición química, entre otras) que les permitan ser totalmente aptos para el proceso de biosecado. Por tal razón, debemos conocer las principales características de los residuos para poder escoger los materiales que nos permitan utilizarlos como posibles fuentes de energía, y de esta manera se pueden crear nuevas rutas de negocio que permitan brindar el servicio para dar a futuro una mayor ventaja competitiva en el mercado de los combustibles sólidos. Como lo señala González Ávila (2009)[5] la alta generación de biomasa en México, lo posiciona como un país con potencial para la generación de combustibles sólidos, lo que nos puede llevar a establecer estrategias sostenibles y sustentables, como el biosecado, que permitan el aprovechamiento de la biomasa residual para ser utilizado como combustible alterno.

Es importante señalar que ésta también es una oportunidad de fortalecer los compromisos entre el sector agrícola y agroindustrial con el medio ambiente, al reducir el impacto que pueden generar sus residuos cuando hay un mal manejo y disposición inadecuada de estos, por lo tanto, el biosecado amortiguaría de una u otra manera los efectos no deseados, emisiones de biogás (principalmente CH_4, CO_2) por la descomposición anaerobia de los residuos en SDF no controlados.

El uso de biomasa para la producción de un biocombustible resulta ser relevante, sobre todo para los países en vías de desarrollo[18], ya que el producto obtenido del biosecado de residuos sólidos orgánicos puede servir como biocombustible, lo que permite contribuir con la conservación de los recursos naturales, y por lo tanto se mantiene de mejor manera el balance ecosistémico y social. Paralelamente se contribuye a mejorar el nivel y la calidad de vida de la población en general.

IV. Conclusiones

Los residuos de los productos agrícolas o agroindustriales más relevantes de México, en función de su volumen de producción, pueden someterse al proceso de biosecado y de esta manera ser valorizados como combustibles sólidos alternos para obtener con esto un beneficio social, económico y ambiental, no solo en las agroindustrias sino en cualquier industria que requiera energía térmica en las diferentes fases de producción.

Por lo que el biosecado puede ser un eslabón importante en las biorrefinerías, lo que le brinda el potencial para contribuir en la solución a las problemáticas relacionadas con la gestión de residuos de estos cultivos y la generación de energía a partir de la producción de biocombustibles sólidos.

Además, la incorporación del biosecado a la línea de proceso de las agroindustrias, contribuirá a generar una economía circular mediante la estabilización de sus propios residuos e implementación de estos como combustible alterno. Adicional a esto, residuos como las cáscaras de coco, bagazo de caña de azúcar y tallos de mandarina presentan características que les permite ser un material estructurante dentro del proceso de biosecado.

V. Referencias

1. Gobierno de los Estados Unidos Mexicanos, 2019. *Anexo Estadístico*. www.gob.mx/presidencia
2. Gobierno de los Estados Unidos Mexicanos. 2019b. www.gob.mx/presidencia
3. SAGARPA y SIAP, 2019. *Expectativas de producción Agropecuaria y Pesquera 2019*. www.gob.mx/siap
4. SIAP, 2020 *Cierre de la producción agrícola por cultivo 2019*. http://infosiap.siap.gob.mx/aagricola_siap_gb/ientidad/index.jsp
5. González Ávila M. E. "Producción de bioenergía en el norte de México: Tan lejos y tan cerca...". Frontera Norte, 21(41), 2009, 177–183.
6. Mejías-Brizuela, N., Orozco-Guillen, E., Galán-Hernández, N. "Aprovechamiento de los residuos agroindustriales y su contribución al desarrollo sostenible de México". Revista de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales. Vol. 2, 2016, No. 6, 27-41. www.ecorfan.org/spain.
7. He, P., Tang, J., Zhang, D., Zeng, Y., & Shao, L. (2010). Release of volatile organic compounds during bio-drying of municipal solid waste. *Journal of Enviromental Sciences*, *22*(5), 752–759. https://doi.org/10.1016/S1001-0742(11)60764-X
8. Shao L. M., Ma Z. H., Zhang H., Zhang D. Q., He P. J. "Bio-drying and size sorting of municipal solid waste with high water content for improving energy recovery". Waste Management, 30(7), 2010, 1165–1170. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.01.011
9. Rada, E. C., Andreottola, G. "RDF/SRF: Which perspective for its future in the EU". Waste Management, 32(6), 2012, 1059–1060. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.02.017
10. Rada, E. C., Ragazzi, M., & Badea, A. (2012). MSW Bio-drying: Design criteria from A 10 years research. *UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering*, *74*(3), 209–216.
11. Bilgin, M., y Tulun, S. "Biodrying for municipal solid waste: volume and weight reduction". Environmental Technology, 36(13), 2015, 1691–1697. https://doi.org/10.1080/09593330.2015.1006262
12. Navaee-Ardeh, S., Bertrand, F., & Stuart, P. R. (2006). Emerging biodrying technology for the drying of pulp and

paper mixed sludges. *Drying Technology*, *24*(7), 863–878. https://doi.org/10.1080/07373930600734026

13. Yang, B., Zhang, L., Jahng, D. "Importance of initial moisture content and bulking agent for biodrying sewage sludge". Drying Technology, 32(2), 2014, 135–144. https://doi.org/10.1080/07373937.2013.795586

14. Frei, B. K. M., Cameron, D., Jasmin, S., Stuart, P. R. "Novel sludge drying process for cost-effective on-site sludge management". Sludge-Pulp & Paper Canada, 4(107), 2006, 47–53.

15. He, P., Tang, J., Zhang, D., Zeng, Y., & Shao, L. (2010). Release of volatile organic compounds during bio-drying of municipal solid waste. *Journal of Enviromental Sciences*, *22*(5), 752–759. https://doi.org/10.1016/S1001-0742(11)60764-X

16. Robles Martínez, F., Silva Rodríguez, E. M., Espinosa Solares, T., Piña Guzmán, A.B., Calixto Mosqueda, C., Colomer Mendoza, F. J., Durán Páramo, E. "Biodrying under greenhouse conditions as pretreatment for horticultural waste". Journal of Enviromental Protection, 2012(April), 298–303. https://doi.org/10.4236/jep.2012.34038

17. Colomer Mendoza, F.J., Robles Martínez, F., Piña Guzmán, A.B., Herrera Prats, L., Gallardo Izquierdo, A. "Influence of different airflows and the presence of bulking agent on biodrying of gardening wastes in reactors". Revista Internacional de Contaminación Ambiental, 32(Residuos sólidos), 2016, 161–171. https://doi.org/10.20937/RICA.2016.32.05.12

18. Robles Martínez, F., Gerardo Nieto, Ó., Piña Guzmán, A.B., Montiel Frausto, L., Colomer Mendoza, F.J. & Orozco Álvarez, C. 2013. Obtención de un combustible alterno a partir del biosecado de residuos hortofrutícolas. Revista Internacional de Contaminación Ambiental, 29(2), 79–88.

19. Colomer Mendoza, F. J., Herrera Prats, L., Robles Martínez, F., Gallardo Izquierdo, A., Carlos Alberola, M. "Secado de residuos de jardinería en reactores mediante procesos biológicos". Revista Internacional Contaminación Ambiental, 28(1), 2012, 59–65.

20. Tom, A. P., Pawels, R., Haridas, A. "Biodrying process: A sustainable technology for treatment of municipal solid waste with high moisture content". Waste Management, 49, 2016, 64–72. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.01.004

21. Chávez Porras, Á., Rodríguez González, A. "Aprovechamiento de residuos orgánicos agrícolas y forestales en Iberoamérica". Academia y Virtualidad, 9(2), 2016, 90–107. https://revistas.unimilitar.edu.co/index.php/ravi/article/view/2003/1987

22. Múgica Álvarez, V. Determinación de factores de emisión de bióxido de carbono (CO_2), partículas en suspensión de 2.5 y 10 micras (PM2.5 y PM10) y contaminantes de vida corta, metano (CH4) y carbono negro por prácticas de quema agrícola. Informe Final. SEMARNAT e INECC, 2014. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/290687/Factores_de_Emision_de_Quema_Agr_cola_CGMCC_2016.pdf

23. Ospina Machado, J. E., Villamizar C. F. "Evaluación de residuos y daños en hortalizas de alto consumo en centrales de abastos en Colombia". Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha, 5(1), 2003, 1–7. http://www.redalyc.org/pdf/813/81350101.pdf

24. Robles Martínez, F., Durán Páramo, E., Sánchez Núñez, J. M. "Como aprovechar desechos sólidos de centrales de abasto".

Revista Industrial del Campo, TEOREMA, 21(Junio-Julio), 2003, 86–88.

25. SAGARPA y SIAP, 2017. *Atlas agroalimentario 2017*. www.gob.mx/siap

26. Gobierno de los Estados Unidos Mexicanos, 2017. *Anuario estadístico de la producción agrícola – cierre de la producción agrícola 2016*. www.gob.mx/presidencia

27. Vargas-Corredor Y. A., Pérez-Pérez L. I. "Aprovechamiento de residuos agroindustriales para el mejoramiento de la calidad del ambiente". Revista de la Facultad de Ciencias Básicas. Vol. 14, No. 2, 2018, 59-72. http://dx.doi.org/10.18359/rfcb.3108

28. SEDEMA, 2020. Inventario de RSU de la Ciudad de México. Secretaria de Medio Ambiente de la Ciudad de México.

29. Ballesteros Vásquez, L.C. 2019. Aplicación de material biosecado como combustible alterno en la industria del piloncillo. Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias en Bioprocesos, 2019. Unidad Profesional Interdisciplinaria de Biotecnología del Instituto Politécnico Nacional. México.

30. Valter E., Luca B., 2008. *Manual de combustibles de madera*. (1st ed.; AVIEBOM, Ed.). Graficas Germinal, S.C.L.

31. Adani F., Baido D., Calcaterra E., Genevinia P. "The influence of biomass temperature on biostabilization–biodrying of municipal solid waste". Elsevier Bioresource Technology, 83(3), 2002, 173–179. https://doi.org/S0960-8524(01)00231-0

32. Colomer Mendoza, F. J., Robles Martínez, F., Herrera Prats, L., Gallardo Izquierdo, A., Bovea, M. D. "Biodrying as a biological process to diminish moisture in gardening and harvest wastes". Environment, Development and Sustainability, 14(6), 2012, 1013–1026.