



RESIDUOS DE FRUTAS Y VEGETALES COMO MATERIAS PRIMAS PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES: POTENCIAL EN EL ESTADO DE GUANAJUATO.

FRUIT AND VEGETABLE WASTES AS RAW MATERIALS TO PRODUCE BIOFUELS: POTENTIAL IN THE STATE OF GUANAJUATO.

Gómez-Castro Fernando Israel ^{1*}, González-Guerra Guillermo Manuel ², Restrepo-Elorza María del Pilar, Montiel-Carrillo Amy Pamela, Álvarez-Rivera Karla Yuritzí, Linares-Luna René Gabriel ¹, Hernández Salvador ¹

¹ Departamento de Ingeniería Química, División de Ciencias Naturales y Exactas, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato, Noria Alta s/n, Col. Noria Alta, Guanajuato, Guanajuato, 36050, México.

² Departamento de Química, División de Ciencias Naturales y Exactas, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato, Cerro de la Venada s/n, Guanajuato, Guanajuato, 36040, México.

* Autor de correspondencia, correo: fgomez@ugto.mx

Resumen

El manejo de residuos orgánicos representa una problemática para las ciudades, debido a los grandes volúmenes que se generan diariamente. Entre estos residuos se encuentran aquellos correspondientes a frutas y verduras, los cuales se producen en importantes cantidades en centrales de abasto, mercados y supermercados. Sin embargo, aun cuando ya no sean aptos para el consumo humano, estos residuos pueden emplearse como fuente de carbono para la producción de combustibles y otros derivados. En este trabajo se presentará primero un panorama general acerca de la generación de residuos orgánicos en México, con un posterior análisis enfocado en los residuos de frutas y verduras producidos en el estado de Guanajuato. Se discutirá acerca de su disponibilidad, sus características y la normatividad vigente en torno a su manejo. Asimismo, se discutirá su potencial como materia prima para la obtención de biocombustibles.

Palabras clave: *Residuos de fruta, residuos de verdura, manejo de residuos orgánicos, normatividad.*

Abstract

Organic wastes' handling is an issue for the cities, due to the great volumes daily generated. Among such wastes, those corresponding to fruits and vegetables can be mentioned; these are produced in great amounts in markets and supermarkets. Even when such wastes are no longer suitable for human consumption, they can be employed as carbon source to produce fuels and other derivatives. In this work, a general overview on the generation of organic wastes in Mexico is first presented, followed by an analysis focused on the production of fruit and vegetables wastes in the state of Guanajuato. A discussion is presented in terms of their availability, characteristics and the current normativity related to their handling. Moreover, their potential as raw material to produce biofuels will be discussed.

Keywords: fruit wastes, vegetable wastes, organic waste management, normativity.

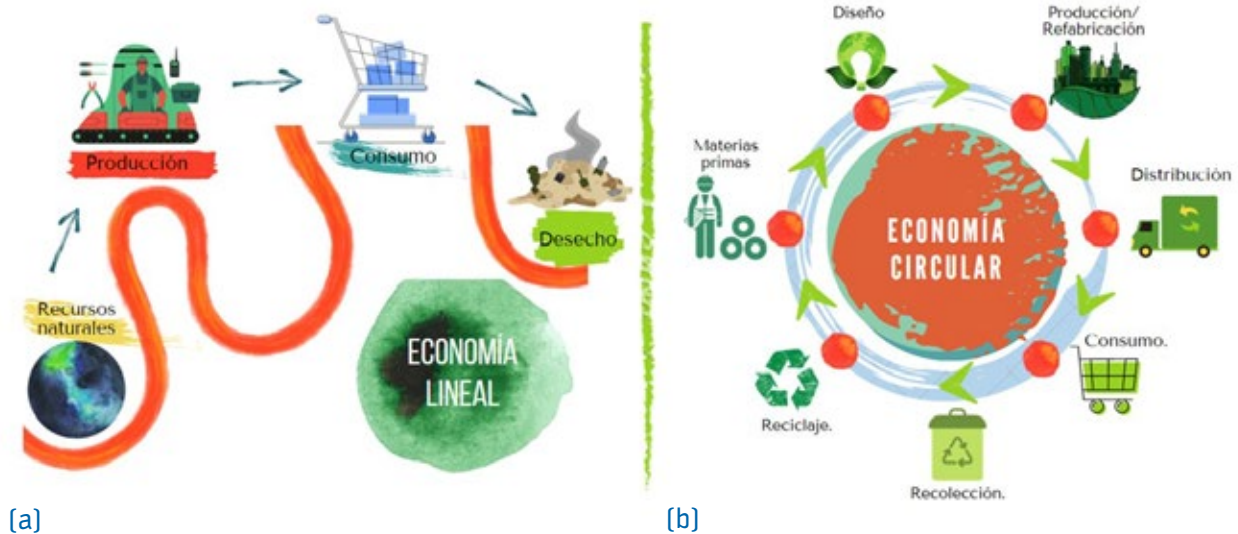
1. Introducción

El mundo actual enfrenta una diversidad de retos económicos y medioambientales para los cuales deben establecerse soluciones desde un punto de vista multidisciplinario. La manera tradicional en la que las necesidades del ser humano son satisfechas no es sostenible, lo cual hace necesario modificar los patrones actuales, tanto conductuales como del entorno productivo. El modelo a través del cual se han regido las actividades del ser humano en los últimos años se conoce como economía lineal, en la cual las materias primas son procesadas para obtener productos o servicios, y los residuos generados son desechados. De igual manera, el producto de interés tiene un periodo de vida útil, al final del cual también es desechado (Figura 1.a). Esta estrategia ha llevado a diversos problemas medioambientales. Por ejemplo, los residuos electrónicos, tales como baterías de computadora y teléfonos celulares, entre otros, se acumulan con el paso del tiempo, y contienen metales pesados que pueden contaminar suelos y cuerpos acuáticos (Li y Achal, 2020: 139745). Otro ejemplo está relacionado con la producción de plásticos, los cuales al final de su uso son desechados y pueden acumularse en el océano, donde afectan a las especies acuáticas y pueden incluso ser ingeridos e ingresar a la cadena alimenticia, ocasionando daños a la salud (Chia y col., 2020: 100065). Debido a esto, en

los últimos años ha tomado una mayor importancia el concepto de economía circular, el cual implica dar un uso a los residuos con el fin de satisfacer necesidades ya sea de la población o de los procesos productivos, así como establecer estrategias para la recuperación y re-uso de los productos al término de su vida útil (Figura 1.b). El modelo de economía circular es consistente con diversos de los objetivos de desarrollo sostenible establecidos por la Organización de las Naciones Unidas dentro de su agenda 2030 (ONU México, s.f.).

El uso de residuos para su conversión en productos de utilidad para la sociedad permite evitar su incorrecta disposición, reintegrándolos a la cadena productiva. Así, se contribuye a la creación de un esquema de economía circular. Un tipo de residuo que ha recibido atención en los últimos años corresponde a los residuos orgánicos, particularmente los desechos de frutas y verduras que se generan, entre otros, en mercados, supermercados, e incluso desde la etapa de cosecha. En ocasiones estos residuos ya no están en condiciones para consumo humano, por lo que se convierten en un desecho. Sin embargo, sus características los convierten en una posible fuente de biocombustibles. Así, en el presente trabajo se describirán las características de los residuos de frutas y verduras, su distribución en México, la normatividad que regula el manejo de residuos orgánicos, así como los productos que se pueden obtener a partir del tipo de residuo bajo análisis.

Figura 1 Modelos de producción (a) economía lineal, (b) economía circular.



2. Disponibilidad de residuos en México

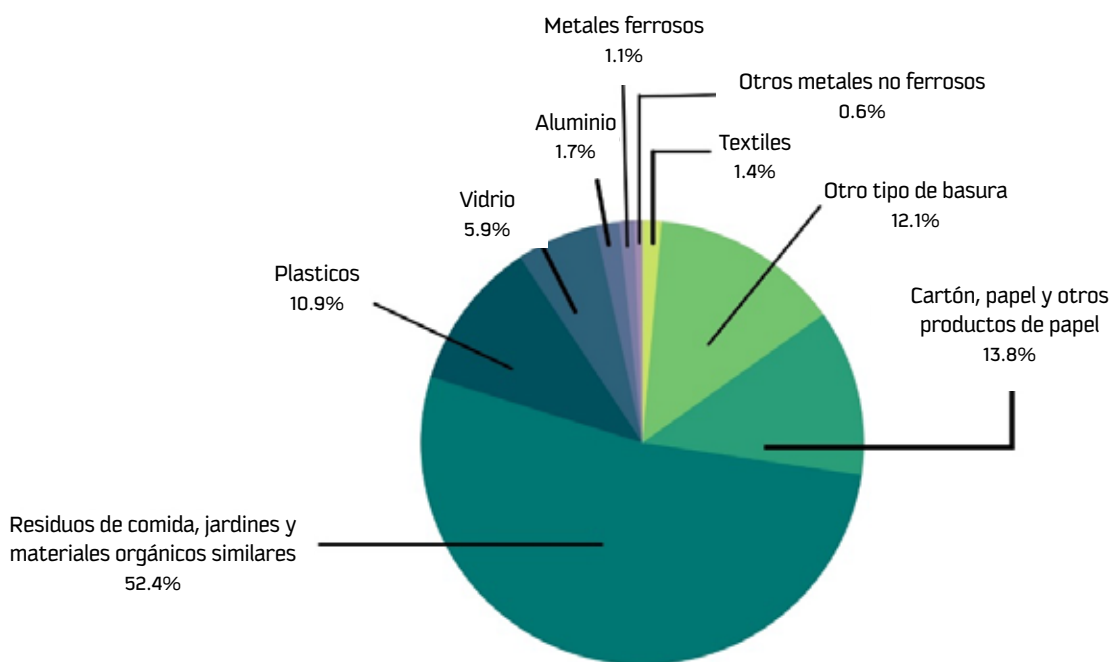
En México la gestión integral de residuos sólidos está regulada en términos de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) a nivel federal, estatal y municipal. Esta Ley entró en vigor desde enero de 2004. Las autoridades federales, estatales y municipales son responsables de determinar el volumen y la composición de los residuos sólidos generados, así como la infraestructura y las capacidades disponibles para su procesamiento o transformación. Además, deben identificar las necesidades al respecto, y diseñar programas encaminados a crear las condiciones para satisfacer tales necesidades.

Los residuos se definen formalmente como los materiales o productos que se desechan ya sea en estado sólido, semisólido, líquido o gaseoso, estos necesitan estar sujetos a tratamiento o disposición final con base en lo dispuesto en la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (DOF, 2003). Se clasifican de acuerdo con sus características y orígenes en tres grupos: residuos sólidos urbanos (RSU), residuos de manejo especial (RME) y residuos peligrosos (RP).

En México, según la cifra más reciente publicada en 2015, la generación de RSU alcanzó 53.1 millones de toneladas, lo que representó un aumento del 61.2% con respecto a 2003 (10.24 millones de toneladas más generadas en ese período). Si se expresa por habitante, alcanzó 1.2 kilogramos en promedio diariamente en el mismo año.

En general, la predominancia de residuos orgánicos o inorgánicos se asocia a la condición económica de la población: en los países con menores ingresos dominan los de composición orgánica, mientras que en los países con mayores ingresos los residuos son principalmente inorgánicos, con una cantidad importante de productos manufacturados (Acurio y col., 1997). Con el paso de los años, México ha cambiado hacia una composición con una menor predominancia de residuos orgánicos: en la década de los cincuenta, el porcentaje de residuos orgánicos oscilaba entre 65 y 70% de su volumen, mientras que en 2012 esta cifra se redujo a 52.4%, como se puede observar en la Figura 2. En la Figura 3 se puede observar el proceso de manejo y disposición de los residuos. Este proceso se lleva a cabo de acuerdo con la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR).

Figura 2
Composición de los RSU en México, 2012 [SEMARNAT, 2013].



Las fuentes bibliográficas consultadas proporcionan una vista panorámica de la gestión de los residuos en México, sin embargo, estas no especifican el manejo y la gestión de residuos de biomasa o de frutas y verduras.

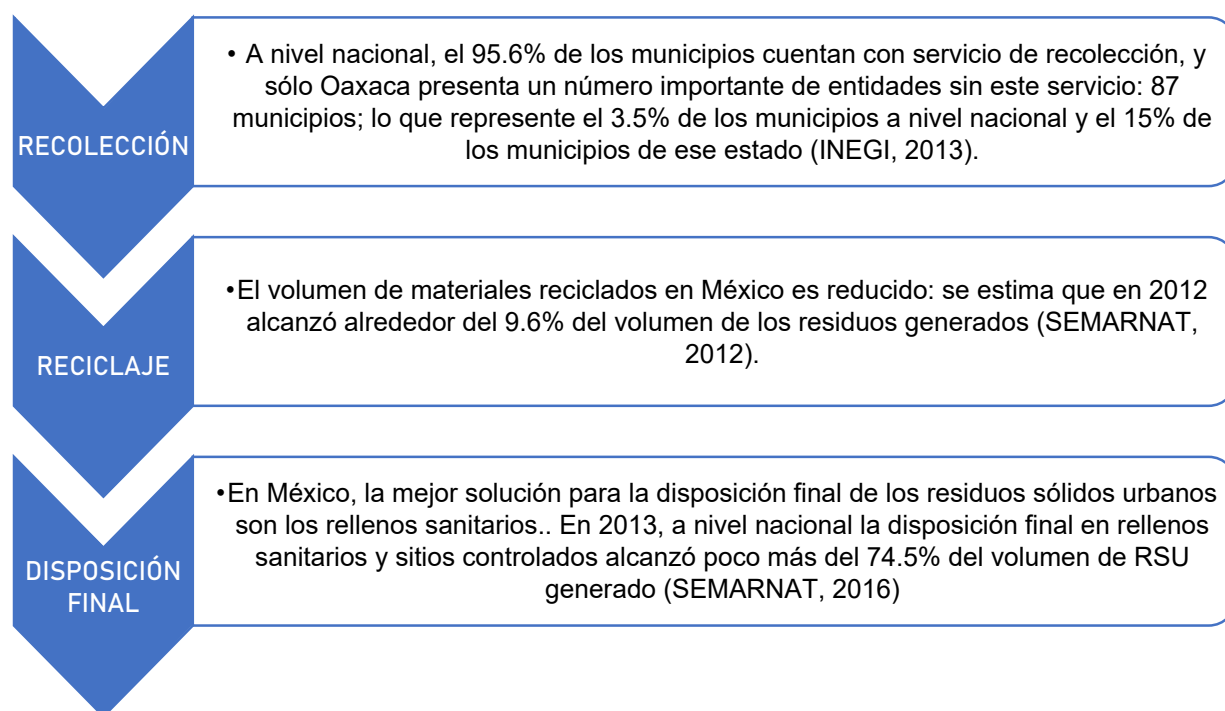
A nivel estatal en Guanajuato la gestión de residuos está regulada por la Ley para la Gestión Integral de Residuos del Estado y los Municipios de Guanajuato (LEGIREMG), además de que con base en el artículo 13 de esta ley se elaboró el Programa Estatal para la Prevención y Gestión Integral de Residuos de Guanajuato (PEPGIRG). Este programa es el principal instrumento de planeación y política ambiental del

Gobierno de Guanajuato en materia de residuos sólidos urbanos, de manejo especial y peligrosos.

Dentro de la composición de los residuos orgánicos que se generan en el estado de Guanajuato, se encuentran principalmente excretas de animales, residuos de plantas, residuos de comida y alimentos, madera, cartón, papel, aceite y lodos de plantas de tratamiento. Los residuos que son de interés para la producción de biocombustibles serían los correspondientes al sector alimenticio, de los cuales se estiman un total de 3,472,573 toneladas anuales (SMAOT, 2020).

Figura 3

Proceso que se sigue a nivel federal, estatal y municipal para el manejo y disposición final de residuos sólidos urbanos.



La cantidad de residuos orgánicos que se estima que son generados en el estado de Guanajuato por el sector alimenticio es de aproximadamente 9,513.90 toneladas diarias. Los municipios que generan la mayor cantidad de residuos orgánicos de acuerdo con los datos del diagnóstico son Irapuato (31.49%), Pénjamo (12.24%) y Celaya (10.86%). Este total de toneladas diarias proviene de diferentes actividades productivas, la agricultura, ganadería y forestal generan un 72.54% de residuos orgánicos, la industria alimentaria (procesadoras de alimentos) 17.91%, los servicios de alojamiento temporal y preparación de alimentos y bebidas (hoteles y

restaurantes) 0.22%, el comercio al por menor (tiendas de autoservicio) 0.7% y el comercio al por mayor (centrales de abastos y mercados públicos) 8.63% (SMAOT, 2020).

3. Distribución de residuos de frutas y verduras en el estado de Guanajuato

A causa de la escasez de información respecto al tipo de residuos orgánicos, en particular residuos de frutas y verduras, en el estado de Guanajuato, los autores de esta contribución han realizado un estudio en las ciudades de Guanajuato, Guanajuato, y León, Guanajuato.

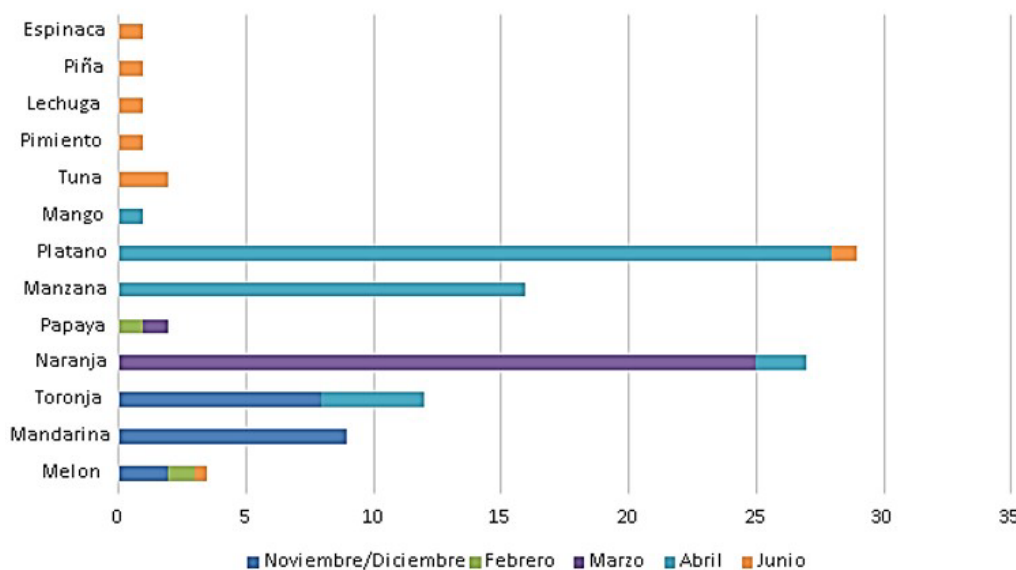
Este análisis tuvo como objetivo evaluar la distribución y características de estos residuos, con enfoque a su aplicación en la elaboración de biocombustibles. Por esta razón, se han obtenido muestras mensuales de residuos agroalimentarios en distintos puntos del estado de Guanajuato durante diferentes temporadas del año. Estas muestras se han obtenido de algunas fruterías y del mercado Hidalgo de la ciudad de Guanajuato, y de la central de abastos de la ciudad de León. Dichas muestras se han analizado para valorar sus características físicas, así como las características de los residuos que pueden impactar en el proceso de conversión a biocombustibles. Entre las características valoradas se encuentra la variación y abundancia del tipo de residuos de frutas y verduras, el aspecto físico de cáscara, pulpa y semillas, la variación de su aspecto con el paso del tiempo, la pérdida de la humedad, así como la presencia de hongos en distintas frutas y verduras observando sus características físicas. De acuerdo con Raven y col. (2019: 14), la presencia de hongos en las muestras es un factor importante por considerar debido a que los hongos tienen la capacidad de reducir las sustancias lignocelulósicas por su mecanismo enzimático, lo cual podría ser útil en el futuro tratamiento de los residuos.

De acuerdo con el análisis de los residuos de biomasa adquiridos (Figura 4), se observa que en temporada de otoño e invierno el tiempo de secado ronda en 20 días y principalmente abunda el melón mientras

que en primavera el tiempo de secado se duplicó, esto debido al incremento de humedad del ambiente en esas temporadas del año, los residuos que se obtuvieron en su mayoría fueron naranja, papaya y plátano. Esta información es importante para la planeación del potencial aprovechamiento de los residuos para la producción de biocombustibles, dadas las variaciones en la composición de cada tipo de residuo, lo cual se describirá con mayor detalle en la sección 3. Debido al cambio de factores climatológicos como humedad y temperatura, el secado de los residuos a condiciones ambiente varía según la temporada del año en la que se hizo el estudio.

Es necesario resaltar que este estudio se ve limitado por diferentes factores, entre ellos se encuentra que las valoraciones se han realizado a distancia debido a la contingencia sanitaria por el virus SARS-CoV-2. Además de esto, las muestras que se han obtenido son pequeñas, lo cual no permite tener un análisis exacto y preciso de la distribución de residuos orgánicos. Por esta razón, se considera un estudio inicial y se tiene la perspectiva de aumentar la cantidad de muestras por temporada con el objetivo de tener un estudio más exacto respecto a la distribución de residuos orgánicos. Sin embargo, el análisis ha permitido obtener información preliminar acerca del tipo de residuos de frutas y verduras que se generan con mayor frecuencia en el estado de Guanajuato, en función de la temporada del año.

Figura 4
Distribución de residuos en las muestras obtenidas.



4. Componentes de los residuos de frutas y verduras

Los residuos de frutas y verduras no son aptos para consumo humano. Sin embargo, aún poseen componentes que los hacen apropiados para su transformación en productos de utilidad para la sociedad. En esta sección se describirán los componentes principales de estos residuos.

Entre los componentes de los residuos de frutas y verduras se encuentran fibras, las cuales se presentan como fibra soluble (pectinas) y fibra insoluble (celulosa y hemicelulosa), con proporciones entre 2 y 9%, dependiendo del tipo de fruta o vegetal. Por otra parte, algunos frutos tienen contenido significativo de grasas en forma de ácidos grasos mono y poliinsaturados, como es el caso del coco (27,0 gr / 100 gr) y el aguacate (13,3 gr / 100 gr). La fracción lipídica de las frutas corresponde a acilglicéridos, glicolípidos, fosfolípidos, carotenoides, triterpenoides y ceras. También poseen carbohidratos, los cuales se encuentran en forma de fructuosa en proporción de 1-8% en las frutas, siendo mayor en las frutas maduras; en las verduras se encuentra entre el 1-6%. Como ejemplo, la remolacha contiene azúcar (10,4 gr / 100 gr). Algunas frutas contienen almidones, como la guanábana (11,9 gr / 100 gr) y el plátano (20,45 gr / 100 gr). Se cuenta también con contenido de proteínas. Las frutas contienen 0,1-1,5% de compuestos nitrogenados y las hortalizas contienen 1-5%; las proteínas constituyen un 35-75% en las frutas y el 35-80% en las hortalizas. Asimismo, contienen vitaminas y minerales, así como una alta proporción de agua (60-95%).

Los componentes contenidos en los residuos de frutas y verduras los hacen candidatos para ser materia prima en la producción de biocombustibles. Las azúcares pueden ser fermentadas para la obtención de alcoholes. Por otra parte, la fracción de celulosa y hemicelulosa puede tratarse para obtener

azúcares adicionales. Asimismo, la fracción lipídica puede emplearse en la producción de biodiésel. La Tabla 1 muestra frutas y verduras comunes en México, con potencial para la síntesis de biocombustibles como el bioetanol, biodiesel y biohidrógeno, así como su composición promedio.

Una de las fracciones útiles en los residuos de frutas y verduras para el posible desarrollo de combustibles está dado por el componente lignocelulósico. Sin embargo, es importante mencionar que un problema para tomar en consideración la lignocelulosa como materia prima para la fabricación de biocombustibles es que la composición química de las lignocelulosas varía mucho entre especies, en este caso para cada una de las frutas y verduras. Debido a esto, resulta importante conocer el tipo de residuos a tratar con el fin de seleccionar un proceso de conversión apropiado. Lo anterior es un claro indicativo de la relevancia del estudio presentado en la sección 3, el cual permite identificar el tipo de residuos con mayor contribución, orientando en la elección del tipo de tratamiento.

Generalmente, la celulosa es el polisacárido estructural dominante de las lignocelulosas seguido de las hemicelulosas y la lignina (Prabhakar Soudham, 2015). La celulosa es una cadena lineal de unidades de glucosa unidas por enlaces $\beta(1\rightarrow4)$. Las hemicelulosas se forman principalmente a partir de cinco azúcares: glucosa, galactosa, manosa, xilosa, y arabinosa. La lignina está integrada por compuestos fenólicos que actúan como inhibidores de la fermentación de los azúcares (Santiago-Ortega y col., 2016: 711). Asimismo, los residuos de fruta también cuentan con fracciones con alto contenido de azúcares fermentables. Finalmente, las semillas de algunos de estos residuos, tales como las de aguacate, tienen contenido de aceite que puede ser útil como materia prima para la obtención de biocombustibles (Dagde, 2019: 215).

Gómez-Castro Fernando Israel, González-Guerra Guillermo Manuel, Restrepo-Elorza María del Pilar, Montiel-Carrillo Amy Pamela, Álvarez-Rivera Karla Yuritzi, Linares-Luna René Gabriel, Hernández Salvador [pp. 8-19]

Tabla 1

Composición de vegetales y frutas con potencial para la producción de biocombustibles [Arroyo Uriarte y col., 2018].

VERDURAS	Agua (g)	Energía (kcal)	Proteínas (g)	Grasas (g)	Hidratos de carbono (g)	Almidón (g)	Azúcares (g)	Fibra (g)
Acelgas frescas	87,5	41	2,0	0,4	4,5	3,5	1,0	5,6
Achicoria	92,0	36	1,7	0,3	4,7	4,0	0,7	4,0
Ajo	70,3	118	5,3	0,3	23,0	20,7	2,3	1,1
Berenjena	93,0	27	1,2	0,2	4,4	0,3	4,0	1,2
Calabacín	96,5	14	0,6	0,2	2,2	0,1	2,1	0,5
Calabaza	95,9	15	0,7	0,2	2,2	0,3	1,9	1,0
Cebolla blanca	93,9	23	1,4	0,2	3,5	0,6	2,9	1,0
Cebolleta	92,2	29	1,4	0,0	5,1	0,0	5,1	1,3
Champiñón	91,4	31	1,8	0,3	4,0	0,0	4,0	2,5
Coliflor	92,4	27	2,2	0,2	3,1	0,4	2,7	2,1
Espinacas	89,6	31	2,6	0,3	1,2	0,3	0,9	6,3
Lechuga	95,3	17	1,5	0,3	1,4	0,0	1,4	1,5
Patata	77,3	88	2,5	0,2	18,0	17,1	0,9	2,0
Pepino	96,7	13	0,7	0,2	1,9	0,1	1,8	0,5
Pimiento morrón	89,4	40	1,1	0,4	7,0	0,1	6,9	2,1
Pimiento rojo	90,3	37	1,0	0,4	6,4	0,0	6,4	1,9
Pimiento verde	94,0	23	0,9	0,2	3,7	0,2	3,5	1,2
Rábanos	95,3	17	1,0	0,1	2,7	0,0	2,7	1,0
Remolacha	89,2	37	1,3	0,0	6,4	0,0	6,4	3,1
Tomate	94,0	22	1,0	0,1	3,5	0,1	3,4	1,4
Yuca, mandioca, casava	58,4	164	1,4	0,3	38,1	36,4	1,7	1,8
Zanahoria	88,7	40	0,9	0,2	7,3	0,0	7,3	2,9
FRUTAS								
Aguacate	78,8	141	1,5	12,0	5,9	Tr	5,9	1,8
Arándano	87,8	42	0,6	0,6	6,1	0,0	6,1	4,9
Círuela	86,3	51	0,6	Tr	11,0	0,0	11,0	2,1
Fresa, fresón	89,6	40	0,7	0,5	7,0	0,0	7,0	2,2
Guayaba	87,6	42	0,9	0,5	5,8	0,0	5,8	5,2
Kiwi	85,9	55	1,1	0,5	10,6	0,0	10,6	1,9
Limón	88,9	44	0,7	0,4	9,0	0,0	9,0	1,0
Mandarina	88,3	43	0,8	Tr	9,0	0,0	9,0	1,9
Melón	92,4	28	0,6	Tr	6,0	0,0	6,0	1,0
Naranja	88,6	42	0,8	Tr	8,6	0,0	8,6	2,0
Piña	86,8	50	0,5	Tr	11,5	0,0	11,5	1,2
Plátano	75,1	94	1,2	0,3	20,0	3,1	16,9	3,4

5. Conversión de residuos de frutas y verduras en biocombustibles

Como se ha descrito en la sección anterior, los residuos de frutas y verduras tienen componentes en común. De entre estos componentes, algunos presentan potencial para la producción de biocombustibles, tales como la fibra, los azúcares, las grasas y los aceites. En esta sección se describirán las rutas de obtención de biocombustibles a partir de estos componentes.

Tres de los componentes más importantes de los residuos de las frutas y verduras son la celulosa, hemicelulosa y lignina. A partir de estos compuestos, es posible la síntesis de bioalcoholes, tales como el bioetanol y el biobutanol. La síntesis puede dividirse en varias etapas. Una de las primeras fases implica un tratamiento preliminar de la materia prima, con el propósito de facilitar el acceso a los azúcares en los tratamientos posteriores. La elección de un pretratamiento adecuado es una etapa fundamental para obtener el mejor rendimiento posible hacia el producto deseado (Galbe y Wallberg, 2019: 294). Dicha elección depende principalmente de las características de la materia prima, lo cual hace importante el conocimiento de las propiedades del material o materiales a partir del cual se obtendrán los biocombustibles. En el caso de los residuos de frutas y verduras, no todas las fracciones requerirán un pretratamiento.

Existen diversos tipos de pretratamientos, los cuales pueden ser mecánicos, térmicos, fisicoquímicos, químicos y biológicos. Entre los tratamientos mecánicos es posible mencionar la trituración, la molienda y la extrusión. Por lo general, este tipo de tratamientos se aplican para reducir el tamaño del material y mejorar la eficiencia de los tratamientos subsecuentes. Los pretratamientos térmicos son, por ejemplo, explosión de vapor, pretratamiento con agua caliente en fase líquida (PAEL), pretratamiento con microondas, y pirolisis. Es posible mencionar como pretratamientos fisicoquímicos la expansión de fibra de amoníaco (AFEX) y la percolación de amoníaco reciclado (ARP). Dentro de los tratamientos químicos se encuentra la oxidación húmeda, la ozonólisis y el tratamiento organosolv.

Finalmente, los tratamientos biológicos se basan en el uso de microorganismos, tales como hongos.

Una vez que se ha removido la lignina, la siguiente etapa corresponde a la hidrólisis. En este procedimiento, los componentes de celulosa y hemicelulosa que se encuentran en los residuos de cascara y pulpa de frutas y verduras se rompen en carbohidratos más simples. Es posible mencionar tres tipos de hidrólisis: ácida, básica y enzimática. La hidrólisis enzimática se basa en emplear microorganismos (enzimas) como catalizadores. Esta característica representa una ventaja sobre la hidrólisis ácida y básica, ya que evita el uso de agentes químicos, la corrosión de la biomasa y disminuyen los costos de producción. Sin embargo, el tiempo requerido para la reacción puede ser muy grande en comparación con los otros tipos de hidrólisis, pasando del orden de minutos para el caso de la hidrólisis ácida a días para la hidrólisis enzimática (Torabi y col, 2021: 2617).

La tercera etapa de síntesis corresponde a la fermentación. En esta fase la biomasa se degrada por acción de microorganismos como levaduras o bacterias en condiciones anaerobias o aerobias. Los productos finales de la fermentación dependen principalmente del tipo de microorganismo empleado. Entre los microorganismos más empleados para la obtención de bioetanol se encuentra *Saccharomyces cerevisiae*, mientras que en la producción de biobutanol se suele emplear *Clostridium acetobutylicum*. Una vez que se concluye la etapa de síntesis es necesario obtener puro el producto de interés, lo cual se lleva a cabo por medio de procesos de separación como la destilación, extracción con solvente, sistemas de membrana, entre otros.

Un segundo componente presente en los residuos de frutas que puede emplearse para la producción de biocombustibles corresponde a la fracción de semillas. Es posible extraer aceites de estas semillas por medio de procesos mecánicos (prensado) o por tecnologías de extracción con solvente. Los aceites pueden ser tratados con alcoholes, regularmente metanol o etanol, para obtener biodiésel. Este proceso puede llevarse a cabo en presencia de hidróxido de sodio como catalizador, aunque otras alternativas implican el uso de catalizadores sólidos

Gómez-Castro Fernando Israel, González-Guerra Guillermo Manuel, Restrepo-Elorza María del Pilar, Montiel-Carrillo Amy Pamela, Álvarez-Rivera Karla Yuritzi, Linares-Luna René Gabriel, Hernández Salvador [pp. 8-19]

o enzimáticos (Gómez-Castro y col., 2022:109), o alcoholes bajo condiciones supercríticas (Gómez-Castro y col., 2015: 2041). En esta reacción se obtiene glicerol como subproducto. Así, una vez que se lleva a cabo la conversión a biodiésel, es necesario recuperar el alcohol en exceso y remover el glicerol para obtener el biocombustible puro. Algunos estudios han valorado el potencial de transformación de residuos agroalimentarios en biocombustibles. Tal es el caso de la biomasa de la papa, la cual es usada como componente principal en la síntesis de bioetanol (Demichelis y col., 2020: 124111). Otro caso es el del maíz, el cual se ha encontrado en numerosos trabajos de investigación en los cuales es el principal elemento para la síntesis de bioetanol y

biohidrógeno (Aruwajoye y col., 2020: 6609).

De acuerdo con el estudio presentado en la sección 3, durante la temporada otoño-invierno en el estado de Guanajuato abundan los residuos de melón, mientras que en primavera se presentan principalmente residuos de naranja, papaya y plátano. En la Tabla 2 se presentan ejemplos de estudios preliminares en torno a la conversión de estas frutas a bioalcoholes, mostrando su potencial para la producción de biocombustibles. La mayor parte de los trabajos están enfocados en la producción de bioetanol, debido principalmente al mayor rendimiento en comparación con la obtención de butanol.

Tabla 2

Conversión de frutas y verduras típicas del estado de Guanajuato hacia biocombustibles.

Materia prima	Producto	Tratamiento	Rendimiento	Fuente
Cáscara de naranja	Bioetanol	Hidrólisis ácida	8.4 mg etanol/g cáscara	Tejeda y col. (2010: 120).
Plátano	Bioetanol	Tratamiento alcalino y microbiano	0.84 g de etanol/g de azúcares	Ingale y col. (2014: 885).
Mezcla de diversas frutas, manzanas, papaya, uvas y plátanos	Bioetanol	Lavado con permanganato de potasio y agua destilada	n.d.	Vishwakarma y col. (2014: 1).
Manzana	Bioetanol	Hidrólisis ácida	0.945 g etanol/g de azúcares totales	Evcan y Tari (2015: 775).
Cáscara de naranja	Bioetanol y biobutanol	Explosión de vapor	4.1 g de etanol/100 mL de hidrolizado; 19.5 g de butanol/L de hidrolizado	Joshi y col. (2015: 55)
Melón	Bioetanol	Hidrólisis	60.5 g etanol/kg melón	Salehi y col. (2018: 127).
Naranja	Bioetanol	Hidrólisis alcalina	32.32 % v/v	Musa y col. (2018: 19).
Manzana	Biobutanol	Tratamiento alcalino y ácido	262 g ABE/kg manzana	Jin y col. (2019: 536)
Cáscara de plátano, mango y papaya	Bioetanol	Hidrólisis ácida	n.d.	Mitiku y Hatsa (2020: 50).

Cabe mencionar que los esfuerzos continúan para la obtención de microorganismos que permitan incrementar el rendimiento hacia butanol, dado que se trata de un biocombustible que puede emplearse en una mayor proporción en los motores existentes.

La mayoría de los estudios relacionados con la conversión de frutas y/o residuos de fruta se enfocan en un tipo de residuo particular, así como una fracción de cada residuo. Son escasos los reportes donde se aborda el tratamiento de mezclas de residuos de diversas frutas. Por otra parte, el tratamiento integral de este tipo de residuos, incluyendo la cáscara, pulpa y semilla, no ha sido abordado. Este tipo de estudios es importante debido a que los residuos que se generan en mercados y centrales de abasto no involucran un solo tipo de fruta, sino que incluyen varios tipos, los cuales varían con cada temporada. Así pues, existe un área de oportunidad importante en el desarrollo de esquemas de aprovechamiento integral de los residuos de frutas y verduras.

Conclusiones

La correcta disposición de los residuos sólidos urbanos representa un reto para la sociedad actual. Sin embargo, dichos residuos pueden incorporarse a un modelo de economía circular para la reintegración de sus componentes a la cadena productiva. En el caso particular de los residuos de frutas y verduras, éstos se generan diariamente, por lo que presentan un alto potencial de aprovechamiento. Dado su alto contenido de azúcares y otros componentes de interés, son una posible materia prima para la obtención de biocombustibles. Con el fin de definir el tipo de derivados que podrían obtenerse a partir de los residuos de frutas y verduras en México, es necesario contar con información referente a las características de los residuos, particularmente los tipos de frutas y verduras que más se desechan en el país. Esta información es escasa, sin embargo, en este trabajo se ha presentado un análisis preliminar para las ciudades de Guanajuato y León, en el estado de Guanajuato, por medio de la cual es posible establecer de manera inicial que el tipo de residuo más común en invierno es el melón,

mientras que el verano es la naranja, papaya y plátano. El contar con este tipo de información permite identificar el tipo de residuos que se generan en mayor proporción en el estado, así como proponer y probar rutas de aprovechamiento para tales residuos.

Agradecimientos

Los autores agradecen profundamente el apoyo de la Universidad de Guanajuato. Asimismo, se agradece a la Dirección General de Servicios Públicos y a los locatarios del Mercado Hidalgo (Guanajuato) por su apoyo para la obtención de muestras para análisis

Referencias bibliográficas

- Acurio, G., Rossin, A., Texeira, P.F. y Zepeda, F. (1997). Diagnóstico de la situación del manejo de residuos sólidos municipales en América Latina y el Caribe. BID, Organización Panamericana. Washington, D.C. Extraído el 04 de octubre de 2021 desde: <https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Diagn%C3%B3stico-de-la-situaci%C3%B3n-del-manejo-de-residuos-s%C3%B3lidos-municipales-en-Am%C3%A9rica-Latina-y-el-Caribe.pdf>
- Aruwajoye, G., Kassim, A., Saha, A. y Kana, E. (2020). Prospects for the improvement of bioethanol and biohydrogen production from mixed starch-based agricultural wastes. *Energies*, 13(24), 6609.
- Arroyo Uriarte, P., Mazquiarian Bergera, L., Rodríguez Alonso, P., Valero Gaspar T., Ruiz Moreno, E., Ávila Torres, J.M., Varela Moreiras, G. (2018). *Informe de estado de situación sobre frutas y hortalizas: nutrición y salud en la España del S. XXI*. Fundación Española de la Nutrición.
- Carrillo-Nieves, D., Rostro Alanís, M.J., de la Cruz Quiroz, R., Ruiz, H.A., Iqbal, H.M.N. y Parra-Saldívar, R. (2019). Current status and future trends of bioethanol production from agro-industrial wastes in Mexico. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 102, 63-74.
- Dagde, K.K. (2019). Extraction of vegetable oil from

- avocado seeds for production of biodiesel. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, 23 (2), 215-221.
- Demichelis, F., Laghezza, M., Chiappero, M. y Fiore, S. (2020). Technical, economic and environmental assesment of bioethanol biorefinery from waste biomass. *Journal of Cleaner Production*, 277, 124111.
- DOF (2003). Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos, México. Extraído el 20 de julio de 2021 desde: http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/263_180121.pdf
- Evcan, E. y Tari, C. (2015). Production of bioethanol from apple pomace by using cocultures: Conversion of agro-industrial waste to value added product. *Energy*, 88, 775-782
- Galbe, M. y Wallberg, O. (2019). Pretreatment for biorefineries: a review of common methods for efficient utilisation of lignocellulosic materials. *Biotechnology for Biofuels*, 12, 294.
- Gebremariam, S.N. y Marchetti, J.M. (2018). Economicsof biodiesel production: Review. *Energy Conversion and Management*, 168, 74-84.
- Gómez-Castro, F.I., Martínez-Sánchez, O. y Ramírez-Corona, N. (2022). Production of biodiesel: from the oil to the engine. En F.I. Gómez-Castro, C. Gutiérrez-Antonio (Eds.), *Biofuels and Biorefining. Volume 1: Current Technologies for Biomass Conversion*. Elsevier. 109-156.
- Gómez-Castro, F.I., Segovia-Hernández, J.G., Hernández, S., Rico-Ramírez, V., Gutiérrez-Antonio, C., Briones-Ramírez, A., Cano-Rodríguez, I. y Gamiño-Arroyo, Z. (2015). Analysis of alternative non-catalytic processes for the production of biodiesel fuel. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 17, 2041-2054.
- Ingale, S., Joshi, S. y Gupte, A. (2014). Production of bio-ethanol using agricultural waste: Banana pseudo stem. *Brazilian Journal of Microbiology*, 45(3), 885-892.
- INEGI (2013). Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Delegacionales 2011 (CNGMD), México. Extraído el 30 de septiembre de 2021 desde: <https://www.inegi.org.mx/programas/cngmd/2011/>
- Jin, Q., Qureshi, N., Wang, H. y Huang, H. (2019). Acetone-butanol-ethanol (ABE) fermentation of soluble and hydrolyzed sugars in apple pomace by *Clostridium beijerinckii* P260. *Fuel*, 244, 536-544.
- Joshi, S.M., Waghmare, J.S., Sonawane, K.D. y Waghmare, S.R. (2015). Bio-ethanol and bio-butanol production from orange peel waste. *Biofuels*, 6(1-2), 55-61.
- Li, C., Yang, X., Gao, S., Chuh, A.H. y Lin, C.S.K. (2018). Hydrolysis of fruit and vegetable waste for efficient succinic acid production with engineered *Yarrowia lipolytica*. *Journal of Cleaner Production*, 179, 151-159.
- Li, W. y Achal, V. (2020). Environmental and health impacts due to e-waste disposal in China – a review. *Science of the Total Environment*, 737, 139745.
- Mitiku, A.A. y Halsa, T.M. (2020). Bioethanol production from decaying fruits peel using *Saccharomyces cerevisiae*. *International Journal of Current Research and Academic Review*, 8(5), 50-59.
- Musa, U., Mohammed, I.A., Munnir, S.M., Garba, M.U., Abdulhamid, A.F. y Uduak, E.P. (2018). Solid state fermentation of orange pomace for bioethanol production. *Covenant Journal of Engineering Technology*, 1(2), 19-27.
- ONU México (s.f.). Objetivos de Desarrollo Sostenible. Extraído el 28 de julio de 2021 desde: <https://www.onu.org.mx/agenda-2030/objetivos-del-desarrollo-sostenible/>.
- Prabhakar Soudham, V. (2015). *Biochemical conversion of biomass to biofuels: pretreatment-detoxification-hydrolysis-fermentation*. Umeå, Suecia: VMC-KBC Umeå.
- Raven, S., Francis, A., Srivastava, C., Kezo, S. y Tiwari, A. (2019). Fungal biofuels: innovative approaches. En A.N. Yadav, S. Singh, S. Mishra, A. Gupta (Eds.), *Recent Advancement in White Biotechnology Through Fungi. Volume 2: Perspective for Value-Added Products and Environments* (pp. 385-405). Cham, Suiza: Springer.
- Rivadeneira, J.P., Wu, T., Ybanez, Q., Dorado, A.A., Migo, V.P., Nayve, F.R.P. y Castillo-Israel, K.A.T. (2020). Microwave-assisted extraction of pectin from “Saba” banana peel waste: optimization,

Gómez-Castro Fernando Israel, González-Guerra Guillermo Manuel, Restrepo-Elorza María del Pilar, Montiel-Carrillo Amy Pamela, Álvarez-Rivera Karla Yuritzi, Linares-Luna René Gabriel, Hernández Salvador (pp. 8-19)

- characterization, and rheology study. *International Journal of Food Science*, 2020, 8879425.
- Salehi, R., Taghizadeh-Alisaraei, A., Jahanbakhshi, A. y Shahidi, F. (2018). Evaluation and measurement of bioethanol extraction from melon waste (Qassari cultivar). *Agricultural Engineering International*, 20(3), 127-131.
- Santiago-Ortega, M., Honorato-Salazar, J.A., Quero-Carrillo, A.R., Hernández-Garay, A., López Castañeda, C. y López-Guerrero, I. (2016). Biomasa de *Urochloa brizantha* cv. Toledo como materia prima para la producción de bioetanol. *Agrociencia*, 50(6), 711-726.
- SEMARNAT (2012). Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos, México. Extraído el 10 de agosto de 2021 desde: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/187440/diagnostico_basico_extenso_2012.pdf
- SEMARNAT (2013). Informe de la situación del medio ambiente en México - Compendio de estadísticas ambientales, indicadores clave y de desempeño ambiental edición 2012, México. Extraído el 10 de agosto de 2021 desde: https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe_12/pdf/Cap7_residuos.pdf
- SEMARNAT (2016). Informe de la situación del medio ambiente en México 2015 - Compendio de estadísticas ambientales, indicadores clave y de desempeño ambiental, México. Extraído el 10 de agosto de 2021 desde: https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/pdf/Informe15_completo.pdf
- SMAOT (2020). Programa Estatal Para La Prevención y Gestión Integral de los Residuos de Manejo Especial de Guanajuato [BORRADOR PARA CONSULTA]. Extraído el 20 de julio de 2021 desde: <https://smaot.guanajuato.gob.mx/sitio/manejo-integral-de-residuos/197/Programa-Estatal-para-la-Prevencion-y-Gesti%C3%B3n-Integral-de-los-Residuos-de-Manejo-Especial-de-Guanajuato>
- Tejeda, L.P., Tejada, C., Villabona, A., Alvear, M.R., Castillo, C.R., Henao, D.L., Marimón, W., Madariaga, N. y Tarón, A. (2010). Producción de bioetanol a partir de la fermentación alcohólica de jarabes glucosados derivados de cáscaras de naranja y piña. *Revista Educación en Ingeniería*, 10, 120-125.
- Torabi, S., Satari, B. y Hassan-Beygi, S.R. (2021). Process optimization for dilute acid and enzymatic hydrolysis of waste wheat bread and its effect on aflatoxin fate and ethanol production. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 11, 2617-2625.
- Vishwakarma, H.S., Kumar, A., Singh, J., Dwivedi, S. y Kumar, M. (2014). Production of ethanol from fruit wastes by using *Saccharomyces cerevisiae*. *International Journal of Renewable Energy Technology Research*, 3(10), 1-5.

