

Aprovechamiento de Residuos Agroindustriales: Pasado, Presente y Futuro

Susana Saval

Instituto de Ingeniería, UNAM, Ciudad Universitaria, México, D.F. 04510
ssavalb@iingen.unam.mx

RESUMEN

Desde hace varias décadas los residuos agroindustriales han sido un foco de atención para varios investigadores a nivel mundial, debido a que parte de sus constituyentes pueden ser materia prima para generar diversos productos de interés, esta situación sigue prevaleciendo en la actualidad y se prevé que continuará en el futuro. Este artículo trata de resumir las experiencias de varios autores y los aspectos más relevantes del aprovechamiento de una variedad de residuos agroindustriales, la revisión bibliográfica corresponde a una muestra de artículos que se identificaron en la base de datos Science Direct dentro del período 1982 a febrero de 2012. También se plantea la necesidad de atender de una manera ambientalmente responsable, la disposición final de los residuos que ya no pueden ser reutilizados, tomando como base el marco regulatorio vigente, para evitar que se conviertan en contaminantes de suelos y agua subterránea.

Palabras clave: residuos agroindustriales, desechos agroindustriales, residuos lignocelulósicos, desechos lignocelulósicos, biocombustibles, residuos como contaminantes de suelo y agua subterránea.

ABSTRACT

For several decades agro-industrial residues has been the focus of attention of several researchers worldwide, because some of its elements may be raw materials to create various products of interest; a situation that keeps on prevailing today and it is expected to continue in the future. This article tries to summarize the experiences of several authors and the key aspects of the exploitation of a variety of agro-industrial residues. The related literature is a sample of articles pinpointed in the Science Direct database from 1982 to February 2012. In addition, it also sets out the need of handling the disposal of waste that cannot be recycled, with an environmentally responsible behavior; so they cannot lead to the pollution of soils and groundwater, a task that must be based on the regulatory framework in force.

Key words: agroindustrial residues, agroindustrial wastes, lignocellulosic residues, lignocellulosic wastes, biofuels, residues as contaminants of soils and groundwater.

INTRODUCCIÓN

En la década de los años 70, una parte importante de los biotecnólogos de todo el mundo enfocaron sus investigaciones hacia la utilización y aprovechamiento de los residuos agroindustriales para la producción de compuestos útiles como insumos de otros procesos industriales; los primeros años la prioridad se enfocó a la generación de productos con valor agregado, años más tarde se sumó la prioridad de utilizar los residuos para reducir el impacto ambiental que ocasiona su disposición, y a partir del presente siglo la prioridad está enfocada a la producción de bioenergéticos y a la elaboración de nuevas formulaciones de alimentos para animales.

El presente artículo, fue escrito con la mejor intención de rendir un homenaje al Dr. Carlos Huitrón Vargas, uno de los promotores de la Sociedad Mexicana de Biotecnología y Bioingeniería, A.C., y líder en su tiempo, en el área de producción de enzimas de interés práctico a partir de residuos agroindustriales.

LOS RESIDUOS AGROINDUSTRIALES

Entre los diferentes enfoques que existen para definir a la “agroindustria” . Se dice que es una “actividad que integra la producción primaria agrícola, pecuaria o forestal, el proceso de beneficio o transformación, así como la comercialización del producto, sin dejar de lado los aspectos de administración, mercadotecnia y financiamiento”. Dicho en otros términos, es una actividad económica que combina el proceso productivo agrícola

con el industrial para generar alimentos o materias primas semi-elaboradas destinadas al mercado. También se dice que constituye una parte del sector industrial que se dedica a producir y/o transformar, almacenar y comercializar productos provenientes del campo. Entre los productos que se industrializan están: frutas, verduras, raíces, semillas, hojas, tubérculos y vainas; algunos se comercializan en fresco y otros son transformados en néctares, jugos, mermeladas, ensaladas, harinas, aceites, vinos, concentrados en polvo y conservas, por mencionar algunos. La tendencia mundial es el notable crecimiento en la generación de residuos, derivado del incremento en la generación de productos comercializables.

A partir del marco de referencia anterior, se puede entonces decir que los residuos agroindustriales son materiales en estado sólido o líquido que se generan a partir del consumo directo de productos primarios o de su industrialización, y que ya no son de utilidad para el proceso que los generó, pero que son susceptibles de aprovechamiento o transformación para generar otro producto con valor económico, de interés comercial y/o social. El problema al que se enfrentan los residuos agroindustriales es que no existe una clara conciencia ambiental para su manejo, además de que falta capacidad tecnológica y recursos económicos para darles un destino final, así como una legislación específica para promover la gestión de este tipo de residuos, que asegure un buen manejo desde su generación hasta

su disposición final. Aún en nuestros días, esta problemática prevalece a nivel mundial.

Con cierta frecuencia al hablar sobre el tema utilizamos en forma indistinta los términos: subproductos, residuos y desechos, sin importar que existe una diferencia conceptual entre ellos. Un “subproducto” es un producto secundario, bien conocido, generalmente útil, comercializable y por lo tanto con valor agregado, que resulta de un proceso industrial. El término “residuos”, se aplica a aquellos que pueden tener o no un valor comercial, porque son poco comunes o porque se generan en bajas cantidades, sin embargo, algunos de sus constituyentes aún en baja proporción, le pueden conferir algún interés para su utilización. Desde este punto de vista, los términos “subproducto” y “residuo” podrían utilizarse como sinónimos, no así el término “desecho”, que está referido a aquellos materiales que no tienen algún valor comercial, ni poseen atributos de interés para ser utilizados en algún proceso, por lo que se consideran como basura y se les debe dar una disposición final.

En general, las características de los residuos agroindustriales son muy variadas, dependen de la materia prima y del proceso que los generó, no obstante, comparten una característica principal que es el contenido de materia orgánica, constituida por diferentes porcentajes de celulosa, lignina, hemicelulosa y pectina. Por ser la materia orgánica su principal componente, en la práctica se les denomina “residuos orgánicos”, dentro de este rubro se incluyen otros residuos, como los lodos de plantas de

tratamiento de aguas residuales, la hojarasca de parques y jardines, así como los residuos domésticos y residuos sólidos municipales.

Valdez-Vazquez *et al.* (2010), publicaron datos oficiales de 2006 que establecen que en México se produjeron 75.73 millones de toneladas de materia seca proveniente de 20 cultivos, de los cuales 60.13 millones de toneladas corresponden a residuos primarios, obtenidos al momento de la cosecha, entre los que están: hojas y tallos del maíz, tallos y vaina de sorgo, puntas y hojas de caña de azúcar, paja de trigo, paja de cebada y de frijol, así como cáscara de algodón. El resto, 15.60 millones de toneladas corresponden a residuos secundarios obtenidos del procesamiento post-cosecha, entre los que están: bagazo de caña de azúcar, mazorcas y olotes, bagazo de maguey o agave, así como pulpa de café.

Algunos datos que sirven para tener una idea del volumen de residuos que generan diferentes tipos de industrias son los siguientes: la industria de la cerveza solamente utiliza el 8% de los componentes del grano, el resto 92%, es un residuo; la industria del aceite de palma utiliza el 9%, el 91% restante es un residuo; la industria del café utiliza el 9.5%, el 90.5% restante es un residuo y la industria del papel utiliza menos del 30%, el resto es un residuo.

Al buscar una oportunidad de aprovechamiento de los residuos, se hace necesaria su caracterización para conocer su composición, la calidad de sus componentes y la cantidad que se genera, con esto se pueden definir las tecnologías más apropiadas para su aprovechamiento y

posterior tratamiento. Respecto a esto último, es de esperar que después del aprovechamiento de un residuo se genere un siguiente residuo más agotado que podría tener otra aplicación, o bien, convertirse en un desecho. En la búsqueda de oportunidades de aprovechamiento de residuos este aspecto deberá ser considerado, con un enfoque de responsabilidad ambiental.

CRITERIOS DE SELECCIÓN DE RESIDUOS CON FINES DE APROVECHAMIENTO

Al paso de los años, se han definido criterios de selección de los residuos para ser aprovechados con fines biotecnológicos, algunos de ellos son:

- Que el principal componente del residuo pueda ser utilizado como sustrato para la producción fermentativa de insumos de procesos industriales, o bien, que el material pueda ser sometido a extracciones para recuperar alguno de sus componentes que tenga un mercado demandante.

- Que el residuo esté disponible localmente y en las cantidades necesarias para asegurar la fabricación de un producto de interés.

- Que no tenga otras aplicaciones o usos que compitan con el proceso que se pretende promover.

- Que no requiera pretratamiento, y en caso de requerirlo, que éste sea sencillo y económico.

- Que la disponibilidad del residuo permita planificar el proceso para el cual se va a utilizar.

- Que sea estable, es decir, que no se descomponga fácilmente bajo las condiciones ambientales del sitio donde se genera.

Con el marco de referencia anterior, se resumen ejemplos de los diferentes usos que se le han dado a diversos tipos de residuos agroindustriales, con base en la siguiente clasificación:

- Como sustrato para la producción fermentativa de metabolitos de interés.

- Como sustrato para la generación de bioenergéticos.

- Como mejoradores o acondicionadores de suelo obtenidos mediante composteo.

- Como suplemento alimenticio para animales.

Por otro lado, cuando los residuos no son reutilizados y se abandonan en el lugar donde se generaron, se convierten en contaminantes de suelos y aguas subterráneas. Este tema se aborda después de revisar los diferentes usos de los residuos.

RESIDUOS AGROINDUSTRIALES COMO SUSTRATO PARA LA PRODUCCIÓN FERMENTATIVA DE METABOLITOS DE INTERÉS

Subproductos y residuos provenientes de diferentes agroindustrias, conteniendo cantidades importantes de celulosa, hemicelulosa, lignina y pectina, son sustratos atractivos para la producción de enzimas de

aplicación industrial, principalmente de aquellas que son inducibles, entre las que destacan: las celulasas, las hemicelulasas, las xilanasas y las pectinasas, las cuales marcaron una época en la historia de la biotecnología.

En el caso específico de las pectinasas, el Dr. Carlos Huitrón y su grupo de trabajo, promovieron el aprovechamiento de la pulpa de henequén, un subproducto rico en pectina que resulta del proceso de eliminación de fibras de las hojas del henequén. Este subproducto está disponible todo el año, no tiene costo y es altamente susceptible al ataque microbiano. A partir de una muestra de suelo sobre el cual se depositaron durante años residuos de la pulpa de henequén en una planta desfibradora, se aisló una cepa que fue identificada como *Aspergillus* sp. H43, la cual a nivel de matraces y fermentadores de 14 litros produjo una actividad pectinolítica siete veces mayor a la de una cepa de *A. niger* de colección (Huitrón *et al.*, 1984; Saval *et al.*, 1982; Saval & Huitrón, 1983; Saval *et al.*, 1983). Las investigaciones sobre la producción de las pectinasas a partir de pulpa de henequén, así como aquellas encaminadas a producir proteína unicelular se llevaron a cabo en el Instituto de Investigaciones Biomédicas de la UNAM (Blancas *et al.*, 1982) y también formaron parte de la cartera de proyectos con la cual inició sus actividades el Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY), en una casona ubicada en la calle 68 entre 59 y 61, en el Centro de la Ciudad de Mérida, Yuc., la cual fue adaptada como laboratorio.

Así como el residuo de la industria henequenera, cuya producción está muy localizada en la península de Yucatán, existe una gran diversidad de residuos en todo el mundo, por lo que es de entender que las soluciones que plantean diversos investigadores vayan encaminadas a resolver problemas locales muy específicos. De la revisión que se hizo, se identificaron los reportes que se mencionan en los siguientes párrafos de esta sección.

A partir de residuos de uva con una cepa de *Aspergillus awamori*, Botella *et al.*, (2005), obtuvieron mediante fermentación sólida a nivel de laboratorio, una mezcla de celulasas, xilanasas y pectinasas, de aplicación en la industria textil, química y de alimentos.

Con una cepa de *Aspergillus niger*, mediante la fermentación sólida de residuos de soya y salvado de trigo, a nivel laboratorio Castilho *et al.* (2000), obtuvieron pectinasas para ser utilizadas en la industria de alimentos en procesos de concentración de jugos de frutas, procesos de extracción de aceites y pigmentos vegetales, así como de obtención de celulosa.

A partir de mazorcas y olotes, cáscara de avena y bagazo de caña por fermentación sumergida a nivel de laboratorio, con una cepa de *Penicillium janthinellum*, se obtuvieron enzimas xilanolíticas para ser utilizadas como aditivo en alimentos de aves de corral, fabricación de pastas, harina de trigo y procesos de blanqueo en la industria química (Oliveira *et al.*, 2006). Con el mismo objetivo, Fanchini *et al.* (2010), utilizaron bagazo de caña, salvado, avena, residuos de cebada y cáscara de yuca como sustrato y

una cepa de *Penicillium janczewskii*, en cultivo sumergido a nivel de laboratorio.

También se reporta la producción de xilanasas de diversas especies de hongos aislados de los mismos residuos donde fueron cultivados, paja de trigo, paja de arroz y bagazo de caña de azúcar; las enzimas pueden ser utilizadas para el blanqueo en la industria del papel (Abdel & El, 2001). Otros autores (Suvarna *et al.*, 2009), reportan la producción de xilanasas de *Aspergillus terreus* a partir de la fermentación sólida de la fibra de palma, a nivel de laboratorio.

Rai *et al.* (2009), obtuvieron una queratinasa a partir de residuos de pluma de gallina en fermentación sólida con una cepa de *Bacillus subtilis*, la enzima puede ser utilizada en formulaciones de detergentes para ropa.

Se reporta la producción de proteasas de *Aspergillus oryzae* en fermentación sólida de residuos provenientes de la extracción de aceite de *Jatropha curcas*; las proteasas producidas pueden ser de utilidad en la industrias de alimentos, farmacéutica y del papel (Thanapimmentha *et al.*, 2012).

Guimarães *et al.* (2007), reportaron la producción a nivel de laboratorio, de D-fructofuranosidasa a partir de residuos agroindustriales de harina de yuca, mazorcas y olotes, harina de avena, paja de arroz, bagazo de caña y salvado de trigo, por fermentación en cultivo sumergido con una cepa de *Aspergillus ochraceus*. La enzima tiene aplicación en la industria alimentaria para la elaboración de azúcares invertidos no cristalizables incluidos en mermeladas, dulces y chocolates suaves.

Utilizando una cepa de *Aspergillus japonicus*, inmovilizada en residuos lignocelulósicos provenientes de la producción de cerveza, paja de trigo, mazorcas y olotes, cáscara de café, corcho y roble, a nivel de laboratorio, Mussatto *et al.* (2009) obtuvieron fructooligosacáridos y B-fructofuranosidasa, que se utilizan en la industria farmacéutica y de alimentos.

Con una cepa de *Penicillium simplicissimum*, Godoy *et al.* (2009), obtuvieron lipasas útiles en la industria química, a partir de la fermentación sólida de residuos de semillas de ricino resultantes de la extracción del aceite.

Se reporta un estudio llevado a cabo en Colombia a nivel de laboratorio para la producción de dextrano y fructosa a partir de cáscara de naranja, piña y cachaza de caña panelera, utilizando una cepa de *Leuconostoc mesenteroides*. Como parte del estudio se realizó la separación de los productos, los autores determinaron sus características y concluyeron que la dextrosa obtenida es grado técnico y se puede utilizar como espesante en la industria de alimentos o como floculante para el tratamiento de aguas residuales (Rodríguez & Hansen, 2007).

Los residuos de piña y tallos de caña de azúcar fueron aprovechados a nivel laboratorio, por una cepa de *Gluconacetobacter swingsii* para la producción de celulosa para ser utilizada como materia prima en la industria química (Castro *et al.*, 2011).

Se reporta la producción a nivel de matraces, de un biosurfactante útil para

remediación de suelos impactados con petróleo, a partir de la fermentación de residuos de la refinación de aceite de cacahuete y extracto de la maceración de maíz con una cepa de *Candida sphaerica* (Sobrinho *et al.* 2008). En otro estudio similar, Oliveira *et al.* (2009), utilizaron residuos de aceite de palma y una cepa de *Pseudomonas alcaligenes* a nivel de matraz, para la producción de un biosurfactante. Ambos estudios se llevaron a cabo en Brasil. Nitschke & Pastore (2006), también estudiaron a nivel laboratorio, la producción de un biosurfactante a partir de la fermentación de las aguas residuales provenientes de la producción de harina de yuca, con una cepa *Bacillus subtilis* LB5a, el biosurfactante puede ser utilizado en una gran variedad de procesos.

En otro estudio realizado en Brasil, a nivel de laboratorio se utilizaron residuos de suero de leche y levadura de una destilería para producir ácido láctico por vía fermentativa con una cepa de *Lactobacillus curvatus* (Oliveira *et al.*, 1996).

Se reporta también la producción de metil-etil-ésteres, que pueden ser utilizados como aditivos de la gasolina, a partir de residuos municipales de alimentos por fermentación anaerobia utilizando las bacterias presentes en los residuos (Sans *et al.*, 1995); el residuo resultante del proceso fermentativo es útil como abono para suelos. El estudio realizado en España se llevó a cabo a nivel piloto.

Se mencionan también aquellos estudios donde mediante un proceso de fermentación se lleva a cabo la desintoxicación de los

residuos, para permitir un aprovechamiento posterior de éstos; por ejemplo: el desarrollo de *Pleurotus* en residuos provenientes de la extracción del aceite de oliva (Zervakis *et al.*, 1996) o la catálisis con enzimas de *Aspergillus niger* (Bouzid *et al.*, 2005), así como la digestión anaerobia de residuos de yuca con *Bacillus* sp. (Obeta *et al.*, 2007).

En Brasil, Loss *et al.* (2009), utilizaron los residuos provenientes del procesamiento del maíz en un cultivo a nivel piloto con una cepa de *Pleurotus* sp., para obtener un sustrato útil en la producción de setas comestibles.

Con residuos de cítricos y lodos resultantes de la industrialización de cítricos, con la cepa *Trichoderma harzianum* T-78, López *et al.* (2010) obtuvieron a nivel piloto, un bioplaguicida utilizado para el control de plagas en plantaciones de melón.

Entre algunos reportes novedosos está la producción de polihidroxibutirato, materia prima para la producción de plásticos biodegradables y elastómeros a partir de la fermentación de suero de queso con una cepa de *Methylobacterium* sp ZP24, a nivel piloto en un fermentador de 30 litros (Nath *et al.*, 2008). También se reporta la producción de polihidroxialcanoato, para los mismos fines, a partir de suero de queso con una cepa recombinante de *Cupriavidus necator*, a nivel de laboratorio (Povolo *et al.*, 2010); también a partir de una mezcla de suero de leche y lodos activados de una planta de tratamiento de aguas residuales de la industria lechera (Bosco & Chiampo, 2010).

En un estudio más reciente se reporta la producción de manganeso peroxidasa producida por *Lentinula edodes* a partir de la

fermentación sólida de residuos de eucalipto (Arantes *et al.*, 2011), la enzima es de gran importancia para la degradación de lignina.

RESIDUOS AGROINDUSTRIALES COMO SUSTRATO PARA LA GENERACIÓN DE BIOENERGÉTICOS

Los principales ejemplos de producción de bioenergéticos a partir de residuos agroindustriales reportados en la literatura, están enfocados hacia la producción de: bioetanol, biodiesel, otros biocombustibles, biohidrógeno y biogás. Para cada uno se hace referencia a los aspectos más relevantes.

Bioetanol

La historia del bioetanol en Brasil data desde 1903, según el Banco de Desarrollo de Brasil (BNDES, 2008), cuando se recomendó la implantación de una infraestructura para la producción de bioetanol automotor; las primeras pruebas formales sobre el funcionamiento de los vehículos se realizaron en 1920. Fue hasta 1931, que el gobierno brasileño determinó mediante decreto, la mezcla obligatoria de al menos un 5% de bioetanol anhidro con la gasolina, por lo que a partir de esa fecha se inició regularmente la producción industrial de éste. A partir de 1975, también mediante decreto el gobierno brasileño instituyó el Programa Nacional de Alcohol (Proálcool), con lo cual se aumentó sustantivamente la producción de bioetanol y se estimuló su uso en motores adaptados o producidos específicamente para su empleo al 100%. A partir de 1985, por razones económicas y políticas, se desincentivó la

fabricación de automotores a bioetanol y con ello la producción de éste; fue hasta el año 2000 que nuevamente repuntó esta actividad, cuando se estableció formalmente el uso de un mínimo porcentaje de bioetanol en la gasolina, que en los últimos años ha sido del 25%. En 2003 con el surgimiento de los automóviles “flex-fuel”, que tuvieron gran aceptación por parte del consumidor, se recuperó nuevamente la expansión de la industria del bioetanol en Brasil. La tecnología de ese tipo de vehículos permite elegir el combustible a utilizar, ya sea gasolina con 25% de bioetanol anhidro o bioetanol sólo, dependiendo del precio, disponibilidad del producto o desempeño del motor.

Así como en Brasil se produce bioetanol a partir de la sacarosa de la caña de azúcar, en los Estados Unidos se produce a escala comercial a partir del almidón del maíz. Dichas materias primas son fuente de alimentos para consumo humano y animal, por lo que es necesario contar con otras alternativas que no compitan con los cultivos alimenticios. Una de estas alternativas y tal vez la más importante, es el bagazo de caña, residuo de la industria azucarera, sin embargo, este material es de naturaleza química muy compleja y requiere ser tratado previamente para permitir su degradación (Carreón *et al.*, 2009).

El pretratamiento y la fermentación de materiales lignocelulósicos para la producción de bioetanol se ha practicado desde el siglo XIX en todo el mundo, pero solamente en los últimos 20 años se ha propuesto como materia prima para atender

el mercado de los biocombustibles. El principal componente de los residuos agroindustriales es la lignocelulosa, la cual está constituida por tres fracciones principales: celulosa (40-60%) que está protegida por hemicelulosa (20-40%) y por lignina (10-25%) (BNDES, 2008). La celulosa es un polímero lineal del dímero glucosa-glucosa con enlaces β -1,4 (celobiosa), su hidrólisis genera unidades de D-glucosa. La celulosa tiene una estructura muy cristalina, rígida y difícil de romper. La hemicelulosa es un heteropolisacárido que contiene 15% de hexosas (D-glucosa, D-manosa y D-galactosa) y 85% de pentosas (D-xilosa 75% y L-arabinosa 10%), además de ácidos metilglucurónico, galacturónico y glucurónico; la hemicelulosa es mucho más fácil de hidrolizar que la celulosa, pero la fermentación de las pentosas que genera no está muy desarrollada. La lignina es un heteropolímero amorfo ramificado de naturaleza fenólica con grupos metoxi y fenilpropánicos formado por alcoholes aromáticos como cumarílico, coniferílico y sinapílico (BDNES, 2008; Carreón *et al.*, 2009; Cuervo *et al.*, 2009).

En general, la primera etapa de pretratamiento de un residuo lignocelulósico para la producción de bioetanol es una molienda para aumentar la superficie de contacto y hacer más accesible el material. Después se pueden aplicar métodos físicos como la explosión con vapor y la termo-hidrólisis, o bien, métodos químicos como la hidrólisis ácida y alcalina. Existen también otros métodos combinados como la explosión

con amonio líquido (Afex) y la explosión con CO_2 .

A pesar de que los métodos de hidrólisis ácida son los más utilizados, son procesos complejos que tienen varias desventajas, entre ellas: que el desdoblamiento de celulosa a glucosa que puede provocar la descomposición de esta última, y en forma simultánea la hemicelulosa se desdobla a pentosas, situación que no es posible de controlar; al mismo tiempo, se forman los productos de la degradación de la lignina que son inhibitorios de la fermentación.

La hidrólisis enzimática, por lo general, se aplica una vez que los residuos han sido previamente tratados, para dejar las cadenas poliméricas más expuestas. Implica la acción de diferentes grupos de enzimas: las celulasas (endoglucanasas, celobiohidrolasas también llamadas exoglucanasas y β -glucosidasas); las hemicelulasas (endo-1,4- β -xilanasas, β -xilosidasa, α -L-arabinofurosidasa y α -glucuronidasa); además de β -manosidasa y β -galactosidasa, así como las fenol-oxidasas (peroxidasas y lacasas que actúan sobre los alcoholes fenólicos de la lignina). Los productos de reacción de las peroxidasas y lacasas, son tóxicos para los microorganismos etanologénicos, por lo que deben ser eliminados. Por el hecho de que la hidrólisis enzimática puede llevarse a cabo bajo condiciones moderadas, Takagi *et al.*, (1977) plantearon un "proceso de sacarificación y fermentación simultánea (SSF)", esta opción se ha visto como la mejor alternativa para la producción de bioetanol a partir de residuos lignocelulósicos a un costo

competitivo a largo plazo (BNDES, 2008). De hecho, este método con frecuencia se cita en varias publicaciones, aunque pocos hacen referencia a los autores que lo desarrollaron y publicaron por primera vez en 1977.

En Brasil, desde 2003 se ha venido operando una planta con el proceso "Organosolv" combinado con el proceso patentado como "DHR (Dedini Hidrólisis Rápida)" (BNDES, 2008), que ha dado muy buenos resultados para el tratamiento de bagazo de caña de azúcar (Oliverio & Hilst, 2004; El Hage *et al.*, 2010). Al parecer, la aplicación de estos métodos más novedosos aún no se ha extendido a nivel mundial, pues pocos son los autores que hacen referencia a ellos. El BNDES (2008), refiere que "a pesar de no haber consenso sobre cuál sería la mejor opción tecnológica para la producción de bioetanol por las vías innovadoras, en todo el mundo los investigadores claman por la construcción de las primeras plantas comerciales que permitirán la obtención de las tan esperadas ganancias por el aprendizaje".

En México, Aburto *et al.* (2008), llevaron a cabo una evaluación técnico - económica de la producción de bioetanol a partir de residuos lignocelulósicos, especialmente de bagazo de caña de azúcar mediante una simulación. Identificaron las operaciones unitarias que tienen mayor impacto en el proceso, que básicamente se refieren al pretratamiento del residuo para el cual consideraron: la ozonólisis (para incrementar la porosidad del material lignocelulósico que representa el 45% del residuo), seguida de la sacarificación (hidrólisis de lignina, celulosa,

hemicelulosa y pectina para transformar los polisacáridos en monosacáridos fermentables y evitar la formación de derivados de furfural que inhiben la actividad microbiana) para llegar a la fermentación (considerando que existen hexosas y pentosas). Concluyeron que para disminuir la inversión de capital y el costo de producción, cada uno de los procesos antes mencionados debe llevarse a cabo al 100%.

Si bien el residuo más utilizado para la producción de bioetanol es el bagazo de caña de azúcar, en la literatura se encontraron una gran variedad de residuos que se han estudiado en diversas partes del mundo para los mismos fines (no se citan las referencias), entre ellos:

- Aceite de palma y racimos libres de la fruta; pulpa, cáscara y tallo de la flor del plátano; mosto resultante de la elaboración de vinos; maíz y cortes de tallos de café, en Colombia.

- Salvado de trigo; cáscara de soya; árbol de las tulipas (*Liriodendrum tulipifera*); hojas de caña de azúcar; rastrojo de maíz; pasto varilla; astillas de madera de álamo y pasto perenne de *witchgrass*, en Estados Unidos de Norteamérica.

- Álamo; eucalipto; paja de trigo; sorgo; pasto perenne de *Brassica carinata*; algarrobo negro; mazorcas; cáscara de soya y planta de plátano, en España.

- Pasto; hojarasca; plantas acuáticas; hojas de caña de azúcar; avena, salvado de trigo, rastrojo de sorgo; mazorca de maíz, en la India.

- Residuos forestales de abeto; tubos de cartón y residuos de panificación, en Irán.
- Paja de arroz; residuos de la planta del plátano; mazorca de maíz en Egipto.
- Residuos de eucalipto; paja de arroz y abeto Douglas, en Japón.
- Tallos de maíz; residuos forestales de arce, álamo y abedul; mazorca de maíz, en China.
- Paja de cebada y pastos perennes de *Phleum pratense*, en Islandia.
- Paja de centeno, paja de colza (canola); paja de haba y ensilado de maíz; maíz, centeno y trébol, en Dinamarca.
- Paja de arroz, pasto elefante y pastos perennes de *Miscanthus flridulus*, en Taiwan.
- Mosto de la elaboración de vinos y remolacha azucarera, en Argentina.
- Paja de trigo, en Grecia.
- Paja y rastrojo de maíz, en Canadá.
- Pasto Bermuda y semilla de colza (canola), en Corea.
- Lodos de papel reciclado, en Portugal.
- Cáscara de fruta de palma, en Malasia.
- Álamo, en Italia.
- Paja de trigo, en Austria
- Celulosa de papel, en Suecia.

Biodiesel

El biodiesel es una mezcla de ácidos grasos de cadena larga y monoalquil-ésteres de alcoholes de cadena corta (metanol o etanol); el grupo éster incrementa el contenido de oxígeno en las mezclas de

diesel-biodiesel y mejora la eficiencia de combustión en motores a diesel. El proceso para la producción de biodiesel consiste en la transesterificación de aceites vegetales con alcoholes de bajo peso molecular como metanol o etanol; la reacción requiere una catálisis que puede ser ácida, alcalina o enzimática. La catálisis alcalina es la que se utiliza en el proceso a escala industrial, a pesar de que consume energía y genera subproductos indeseables difíciles de separar durante la purificación del biodiesel (Gog *et al.*, 2012).

La historia del biodiesel es también muy antigua, podría remontarse a 1893, cuando Rudolf Diesel, inventor del motor que lleva su nombre, corrió su primer modelo en Alemania utilizando aceite de cacahuate como combustible. En remembranza a este hecho, el 10 de agosto se declaró como el “día internacional del biodiesel”. El uso del aceite vegetal continuó hasta 1920, antes de que el diesel fósil desplazara del mercado a los aceites vegetales. De hecho el diseño del motor original tuvo que ser modificado para que pudiera operar con diesel fósil, debido a su menor viscosidad. Años más tarde, en 1937, un científico belga desarrolló un “procedimiento para la transformación de aceites vegetales para su uso como combustibles” protegido por una patente. En dicha patente, se propuso por primera vez el uso del término “biodiesel”. Cuarenta años después, en 1977, un científico brasileño aplicó para obtener la primera patente del “proceso para producción de biodiesel a escala industrial”. En 1979, en Sudáfrica se inició la investigación para la refinación de

aceite de girasol transesterificado con la finalidad de ajustarlo a los estándares del diesel. En 1987, una compañía austriaca estableció la primera planta piloto para la producción de biodiesel y en 1989 la primera planta industrial. En 2002 se publicó la norma ASTM D6751 con las especificaciones para biodiesel. En 2005 Minnesota, en Estados Unidos, estableció como mandato el utilizar 2% de biodiesel en todo el diesel que se vendiera en el estado; en ese mismo año, Filipinas decidió una acción similar, al establecer el uso de un 1% de biodiesel proveniente de aceite de coco en mezcla con diesel en los vehículos de uso oficial. También como parte de la historia, el proceso de transesterificación de un aceite vegetal, fue realizado por primera vez en 1853, por los científicos Duffy y Patrick (citado por Lin *et al.*, 2011).

A nivel mundial, Alemania es el principal productor de biodiesel; los aceites más utilizados son de semilla de colza (canola), soya, girasol y palma. Otras fuentes para la obtención de biodiesel son los aceites de: almendra, cebada, coco, copra, nuez, laurel, avena, salvado de arroz, ajonjolí (sésamo), sorgo y trigo, entre otros, pero debido a que todas estas materias primas son comestibles, se han buscado otras fuentes como: *Jatropha* (piñón de tempate), *Karanja* y *Camelina* que son aceites no-comestibles, microalgas, además de residuos provenientes de: grasas animales incluyendo la del pescado, aceites gastados de la cocina y grasas de desechos de restaurantes (Lin *et al.*, 2011).

Las reacciones de transesterificación enzimática incluyen la conversión de

triglicéridos a diglicéridos y posteriormente a glicerol, se requiere la presencia de aceptores de los grupos acilo-, generalmente se utilizan alcoholes de cadena corta como metanol o etanol. Estas reacciones las llevan a cabo lipasas que tienen una excelente actividad y estabilidad en medios no-acuosos, sobre una amplia variedad de triglicéridos. Los principales microorganismos productores de lipasas extracelulares son: *Candida antartica*, *Pseudomonas cepacia*, *Rhizopus oryzae* y *Mucor meihei*; la desventaja de las lipasas extracelulares es el costo de separación y purificación del complejo enzimático. Entre las ventajas de las lipasas solubles, que incluyen las extracelulares y preparaciones comerciales, se pueden citar que el procedimiento de preparación es sencillo, pero pueden ser utilizadas una sola vez y después se inactivan principalmente por la presencia del alcohol aceptor de grupo acilo-. La inmovilización de las lipasas solubles permite que éstas sean reutilizadas, su estabilidad operacional y temperatura óptima aumentan las velocidades de conversión y con ello se acortan los tiempos de reacción. Por lo que respecta a las lipasas intracelulares, los principales microorganismos productores pertenecen a los géneros de *Aspergillus* y *Rhizopus*, algunas variedades se han inmovilizado; aunque los resultados han sido calificados como exitosos por las eficiencias de conversión, se tienen limitaciones en la transferencia de masa que constituyen un obstáculo para su desarrollo. Respecto al efecto inhibitorio del metanol o etanol sobre las lipasas, se han probado otros alcoholes y

además se han incluido disolventes orgánicos, cuya función es proteger a las lipasas de la desnaturalización derivada de la alta concentración de alcoholes, pero aún no se han podido superar las dificultades técnicas que han surgido (Gog *et al.*, 2012). Las investigaciones novedosas van enfocadas a la búsqueda de otras opciones tecnológicas para la transesterificación, entre las que se encuentran: el uso de fluidos supercríticos, el hidrotatamiento y el uso de óxidos de metales sólidos como estaño, magnesio y zinc (Helwani *et al.*, 2009). En virtud de que actualmente la producción industrial de biodiesel es dependiente de aceites vegetales comestibles, Atabani *et al.* (2012), hacen una revisión muy detallada de las ventajas y desventajas del biodiesel, así como de aspectos económicos y de desarrollo sustentable.

Un aspecto importante es que el proceso para la producción de biodiesel, genera residuos para los cuales se deben buscar alternativas de uso o tratamiento con la finalidad de completar su ciclo de vida.

Las microalgas de interés como materia prima para la elaboración de biodiesel son aquellas con altos contenidos de lípidos, que por lo general se sintetizan bajo condiciones de estrés según las condiciones de cultivo; entre las especies que se han reportado están: *Botryococcus brawnii*, *Chlorella*, *Cylindrotheca*, *Nannochloropsis*, *Nitzschia* y *Schizochytrium*, las cuales pueden producir aceites en una proporción tan alta como 75% del peso seco. En México, se ha venido realizando investigación en este tema, en el

CINVESTAV y el Instituto de Biotecnología de la UNAM.

Existen también algunas especies de levaduras y bacterias que producen aceites, entre las cuales se han reportado las siguientes: *Trichosporum fermentans*, *Lipomyces starkeyi*, *Mortierella isabellina* y *Cunninghamella echinilata*; el contenido máximo de aceites que producen es de 68% (Luque *et al.*, 2008). Los estudios sobre este tema son muy escasos.

OTROS BIOCMBUSTIBLES

En relación a los combustibles de aviación, se produce a escala comercial el Bio-SPK (Bio- Synthetic Paraffinic Kerosene), algunas veces referido como HRJ (Hydroprocessed Renewable Jet), sintetizado generalmente a partir de grasas animales y aceites provenientes de algas, camelina, canola, coco, maíz y soya. El proceso de producción es de tipo químico, consta de dos pasos: primero una hidroxigenación de los ésteres de ácidos grasos, seguida de una isomerización. El producto contiene en su mayoría parafinas ramificadas con un punto de ebullición bien definido para cumplir con los estándares de aviación, que son muy estrictos.

Por otra parte, Yusuf *et al.* (2011) hace referencia a una patente suiza para la producción de biometanol a partir de residuos, vía gasificación de licores negros a un costo competitivo, estos licores actualmente se utilizan para la producción de pulpa y papel.

Entre las pocas investigaciones a escala industrial que se han publicado sobre

biocombustibles está la producción de acetona-butanol, que llevó a cabo el Instituto Francés del Petróleo como parte del programa para Sustitución de Combustibles, mediante un proceso que involucra un pretratamiento por explosión con vapor del residuo lignocelulósico que en este caso fueron mazorcas y olotes, seguida de la hidrólisis enzimática con celulasas y la fermentación del hidrolizado con una cepa de *Clostridium acetobutylicum*, esta cepa es capaz de utilizar la xilosa y tiene una baja sensibilidad a los compuestos inhibidores de la fermentación que se producen durante el pretratamiento. La hidrólisis enzimática en lote se llevó a cabo en un reactor agitado de 25 m³ y la fermentación en reactores de 50 m³ (Marchal *et al.*, 1992).

Biohidrógeno

Entre los estudios reportados sobre producción de biohidrógeno a partir de residuos agroindustriales, están:

- La utilización de paja de arroz con los microorganismos presentes en el residuo (Chang *et al.*, 2011), por fermentación anaerobia a nivel de laboratorio en Taiwan.
- En México, se utilizaron vinazas provenientes de la elaboración del tequila en un reactor secuencial anaerobio de 7 litros operado en lote (Buitrón y Carvajal, 2010), los resultados demostraron la factibilidad del proceso sin necesidad de un tratamiento previo del residuo.
- Otro grupo de investigación en México, utilizó un hidrolizado ácido de paja de

avena rico en almidón en un reactor empacado operando en continuo a nivel laboratorio (Arriaga *et al.*, 2011). El mismo grupo realizó experimentos a nivel laboratorio utilizando suero de queso y un inóculo proveniente de un reactor anaerobio granular, en lote en viales serológicos de 120 ml (Dávila-Vázquez *et al.*, 2008a) y en continuo en un reactor agitado de 3 litros (Dávila-Vázquez *et al.*, 2009). También estudiaron la producción de biohidrógeno utilizando suero de queso y una cepa mejorada genéticamente de *Escherichia coli* en biorreactores de un litro (Rosales-Colunga *et al.*, 2010).

Dávila-Vázquez y Razo-Flores (2007), refieren que la producción de Bio-H₂ es altamente dependiente de las condiciones de fermentación como son: la naturaleza química y la concentración de sustrato, tipo de inóculo y tratamiento del mismo, el pH, los tiempos de retención y la presión parcial de hidrógeno, lo cual afecta el balance metabólico. De lo anterior concluyen que los retos a abordar son básicamente dos: 1) aumentar los rendimientos de producción, y 2) encontrar los procesos de recuperación de H₂ de los biorreactores; este último paso es crucial para la aplicación práctica del Bio-H₂ en las celdas de combustible para producir electricidad. En cuanto al análisis económico de la producción fermentativa biohidrógeno poco se ha reportado, Dávila-Vázquez *et al.* (2008b) identificaron dos principales barreras: el costo de fermentación para aumentar los rendimientos y el medio de cultivo. Para aumentar los rendimientos

mencionan el mejoramiento genético de los microorganismos y respecto al medio de cultivo establecen que los residuos agroindustriales representan una buena alternativa, sin embargo, su utilización para la producción de biocombustibles podría no satisfacer la demanda.

Biogás

Algunos ejemplos de producción de biogás como energético, son los siguientes:

- Un estudio de Grecia, realizado en reactores anaerobios, en el que utilizan aguas residuales provenientes de la producción de aceite de oliva, estiércol de vaca y suero de queso con las bacterias presentes en los residuos; el residuo resultante es útil como fertilizante, pero no se evaluaron sus características (Dareitoti *et al.*, 2009).
- A partir de residuos de industrialización de la papa y efluentes de una procesadora de papa en reactores anaerobios, con los microorganismos nativos (Parawira *et al.*, 2005). Del mismo grupo de investigación, y bajo las mismas condiciones, se reporta el uso de residuos de papa y remolacha azucarera (Parawira *et al.*, 2008); los estudios se llevaron a cabo en Zimbawue.
- Sandoval *et al.* (2009), estudiaron en Colombia la digestión anaerobia a nivel de reactores de residuos orgánicos urbanos, lodos de una planta de tratamiento y estiércol de cerdo; mencionan que el efluente se puede utilizar como biofertilizante.

INVESTIGACIONES EN MÉXICO SOBRE BIOENERGÉTICOS

A partir de las Memorias del XIII Congreso Nacional de Biotecnología y Bioingeniería (2009) (www.smbb.com.mx), se identificaron las instituciones (en orden alfabético), que en México están realizando investigación relacionada con la producción de bioenergéticos, con énfasis en el aprovechamiento de residuos agroindustriales:

- Centro de Desarrollo de Productos Bióticos, Yautepec, Mor., Instituto Politécnico Nacional
- Centro de Investigación en Química Sustentable, Universidad Autónoma del Estado de México – Universidad Nacional Autónoma de México
- Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco (CIATEJ), Guadalajara, Jal., Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología
- Centro de Investigación y Estudios Avanzados (CINVESTAV), Instituto Politécnico Nacional
- Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional (CIIDIR), Unidad Michoacán, Instituto Politécnico Nacional
- Instituto de Biología, México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México
- Instituto de Biotecnología, Cuernavaca, Mor., Universidad Nacional Autónoma de México

Artículos

- Instituto de Ingeniería, Unidad Académica Juriquilla, Qro., Universidad Nacional Autónoma de México
- Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (IPICYT), San Luis Potosí, S.L.P., Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología
- Instituto Tecnológico de Durango, Dgo.
- Instituto Tecnológico de Mérida, Yuc.
- Instituto Tecnológico de Zacatepec, Mor.
- Unidad Profesional Interdisciplinaria de Biotecnología (UPIBI), Instituto Politécnico Nacional
- Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa
- Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Mich.
- Universidad Politécnica de Chiapas, Chis.
- Universidad Politécnica de Pachuca, Hgo.

En el XIV Congreso Nacional de Biotecnología y Bioingeniería (2011) (www.smbb.com.mx), se sumaron las siguientes instituciones:

- Centro de Investigación y Estudios Avanzados - Unidad Irapuato, Instituto Politécnico Nacional
- Instituto Tecnológico de Morelia, Mich.
- Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec
- Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías (CUCEI)
- Universidad Autónoma de Tlaxcala, Centro de Investigación en Ciencias Biológicas (CICB)

- Universidad Iberoamericana
- Universidad Autónoma de Chihuahua
- Universidad Autónoma de Coahuila
- Universidad Autónoma del Estado de Morelos
- Universidad Autónoma de Querétaro
- Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Cuajimalpa
- Instituto Tecnológico Superior del Sur del Estado de Yucatán.

MARCO REGULATORIO PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL Y BIODIESEL EN MÉXICO

El marco regulatorio que se estableció en México a nivel federal para la producción de bioetanol y biodiesel, está conformado por la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos (2008) y su Reglamento (2009), el Acuerdo por el que se emiten los Lineamientos para el otorgamiento de permisos para la producción, el almacenamiento, el transporte y la comercialización de bioenergéticos del tipo etanol anhidro y biodiesel (2009), el Acuerdo por el que se emiten los formatos de solicitudes de permisos para la producción, el almacenamiento, el transporte y la comercialización de bioenergéticos del tipo etanol anhidro y biodiesel (2009), el Acuerdo mediante el cual se delega en el Subsecretario de Planeación Energética y Desarrollo Tecnológico, las facultades a que hace referencia el artículo 12 de la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos (2009) y el Decreto por el que se aprueba el Programa Especial para el Aprovechamiento

de Energías Renovables 2009-2012 (2009). Corresponde a la Dirección de Bioenergéticos de la Secretaría de Energía y a la Comisión Intersecretarial para el Desarrollo de los Bioenergéticos (donde intervienen las Secretarías de Energía; de Medio Ambiente y Recursos Naturales; de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación; de Hacienda y Crédito Público, de Economía), vigilar que las acciones vayan encaminadas conforme a lo previsto. Como documentos oficiales de apoyo están: el Programa de Introducción de Bioenergéticos (Secretaría de Energía, 2008), Los Bioenergéticos en México (Comisión Intersecretarial para el Desarrollo de los Bioenergéticos, 2008), la Estrategia Intersecretarial de los Bioenergéticos (Comisión Intersecretarial para el Desarrollo de los Bioenergéticos, 2009) y Energías renovables para el desarrollo sustentable en México (Secretaría de Energía, 2009) que elaboró la Secretaría de Energía con la colaboración de GTZ (Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit, actualmente GIZ).

USO Y DISPONIBILIDAD DE BIOCOMBUSTIBLES EN MÉXICO

La producción de bioetanol en México merece un análisis económico y estratégico muy riguroso, pues las evidencias de los últimos años indican que existen excedentes de azúcar y que en la mayor parte de los ingenios se produce alcohol de 96° para el mercado de bebidas y usos industriales, pero no para su uso como aditivo de las gasolinas (Becerra, 2010). No se ha revisado si la

tecnología de los automotores de combustión interna actuales permitiría el uso de mezclas de gasolina-etanol y en qué proporción, por lo que realmente todavía no existe una demanda para el bioetanol.

Respecto al biodiesel, en México ya se instaló la primera planta de producción de biodiesel en la zona industrial de Puerto Chiapas, y en Tuxtla Gutiérrez la primera surtidora de biodiesel al 100%, para que cada usuario decida el porcentaje a utilizar, que generalmente es 10% en mezcla con diesel fósil en automóviles. El transporte público de la región mezcla el 20% de biodiesel. El aceite que se utiliza como materia prima se extrae de diferentes fuentes: *Jatropha curcas*, palma, aceite vegetal usado que se recolecta en restaurantes y hoteles, así como sebo de rastros porcinos (www.chiapas.gob.mx).

Por otra parte, la paraestatal Aeropuertos y Servicios Auxiliares coordinó los esfuerzos para llevar a cabo el primer vuelo de demostración de un avión comercial en abril de 2011, con la ruta México - Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, este vuelo fue el séptimo en su tipo, a nivel mundial y el segundo en Latinoamérica. La materia prima que se utilizó fue la semilla de *Jatropha curcas*, la cual se obtuvo mediante donaciones de productores mexicanos de los estados de Chiapas, Yucatán, Michoacán y Puebla; se extrajo el aceite y se pre-refinó en Guadalajara; posteriormente, se trasladó a una bio-refinería en Pasadena, Texas, donde fue procesado. La composición del bioenergético utilizado fue 27% Bio SPK y 73% de turbosina fósil; el biocombustible se

alimentó solamente en uno de los motores del Airbus 320-214. En ese mismo año se llevaron a cabo otros dos vuelos con aviones Boeing partiendo de la Ciudad de México, uno con destino a San José de Costa Rica y otro a Madrid, en ambos el biocombustible contenía 25% Bio SPK y 75% turbosina fósil. A partir de julio de 2011, la especificación ASTM D 7566-11 oficializó la certificación del biocombustible de turbina (www.asa.gob.mx).

RESIDUOS AGROINDUSTRIALES COMO MEJORADORES O ACONDICIONADORES DE SUELOS OBTENIDOS MEDIANTE COMPOSTEO

La composta constituye un "grado medio" de descomposición de la materia orgánica, en la que no interviene la mano del hombre, el reciclaje es 100% natural, participan los microorganismos presentes en los residuos. La elaboración de composta, composteo o compostaje, es una técnica ancestral muy utilizada para la estabilización de residuos, el producto obtenido es rico en los nutrientes necesarios para abonar las tierras de cultivo. En los siguientes párrafos se presentan algunos ejemplos de la elaboración de composta a partir de residuos agroindustriales:

Residuos de la producción de cerveza fueron sometidos a composteo a nivel piloto, la composta resultante fue probada en dos tipos de suelo diferentes donde se sembró maíz (Mbagwu & Ekwealor, 1990).

Baca *et al.* (1992) transformaron en composta los residuos provenientes del proceso de cardado del algodón, a nivel

piloto en pilas aireadas mediante volteo y ventilación.

García *et al.* (2002) llevaron a cabo un estudio a nivel piloto, para el composteo de residuos de levadura y malta de la industria cervecera, podas de árboles y hojas de olivo. El producto resultante fue utilizado para producción de plantas ornamentales de caléndula y como composta comercial.

A partir de residuos municipales orgánicos, residuos de cultivos y lodos de tratamiento de aguas residuales en la Isla de Creta (Grecia), Manios (2004) obtuvo, a nivel piloto, una composta útil para el enriquecimiento de suelos. Con un enfoque similar, Madejón *et al.* (2001), utilizaron residuos de vinazas de la industria azucarera y desechos municipales orgánicos; así mismo, Sánchez *et al.* (2008) utilizando residuos de la extracción de aceite de oliva, estiércol de oveja, paja de corrales de ganado y tallos de uvas en diferentes proporciones, obtuvieron a nivel piloto en España, una composta que fue mezclada con un suelo para evaluar la permanencia del carbono en el suelo.

Ribeiro *et al.* (2007), reportaron el composteo a nivel piloto, de residuos forestales y estiércol de cerdo en pilas aireadas, para obtener un sustrato útil para la producción de plántulas de tomate y lechuga, en Portugal. Otros ejemplos similares son: el estudio de Benito *et al.* (2005) quienes prepararon composta a partir de residuos de la poda de hierbas y hojas, así como los de Bustamante *et al.* (2008a, 2008b) quienes sometieron a composteo el orujo de uva con

estiércol de ganado vacuno y de aves de corral.

Tosun *et al.* (2008) reportaron el compostaje de residuos provenientes de la extracción de aceite de rosas y residuos sólidos municipales en reactores discontinuos de 65 litros, el producto obtenido se utilizó como fertilizante.

En España, mediante composteo de residuos sólidos municipales y los microorganismos autóctonos, Herrera *et al.* (2008), obtuvieron a nivel piloto un fertilizante orgánico que fue utilizado para el cultivo de jitomates. En otro estudio similar, Ostos *et al.* (2008), sometieron a composteo residuos de poda, residuos orgánicos municipales y lodos de una planta de tratamiento para obtener una composta de vivero, donde se pudo apreciar el crecimiento del arbusto *Pistacia lentiscus*, que produce una goma aromática. También se reportó el composteo a nivel piloto, de residuos provenientes de la extracción del aceite de olivo, restos de poda de olivos, estiércol de oveja y de caballo, con adición de urea; la degradación de la materia orgánica fue llevada a cabo por la flora microbiana presente en los residuos. Utilizando diferentes proporciones de cada uno de los residuos se dio seguimiento al contenido de gases generados en el proceso: bióxido de carbono, metano y óxido nitroso, con la finalidad de identificar la proporción de éstos que genera las más bajas emisiones de gases de efecto invernadero (Sánchez *et al.*, 2010).

RESIDUOS AGROINDUSTRIALES COMO SUPLEMENTO ALIMENTICIO PARA

PARA ANIMALES

En tiempos de crisis económicas, el aumento de precios de los cereales obliga a buscar alternativas de alimentación para el ganado que sean más económicas y rindan los mismos resultados que los cereales. El aspecto más importante de los materiales de sustitución es el valor nutricional que está conformado por tres características:

a) El contenido de humedad, debe ser entre 15 y 30% (base seca), esto condiciona el método de conservación y el costo del transporte.

b) El valor proteico, que en general es relativamente elevado en verduras como la alcachofa y bajo en frutas.

c) Tipo de fibra y su contenido en el material; si el alimento va a ser destinado a rumiantes debe tener alto valor energético; en el caso de animales monogástricos la fibra proveniente de frutas es fácilmente fermentable y tiene un efecto prebiótico.

Si la composición satisface las necesidades, la siguiente discusión incluye un análisis de costos por unidad de energía y costo por unidad de peso del alimento tradicional comparado con la nueva formulación que incluye el subproducto o residuos que se pretende utilizar.

Lo anterior lleva a toda una investigación que incluye: el análisis de la composición química, la decisión de los animales destino y la capacidad de utilización. Los parámetros a considerar para la toma de decisiones que en el campo de alimentación animal están bien definidos son: índices productivos, salud intestinal, efectos sobre el rendimiento y la calidad del producto final (en caso de leche y

quesos), así como la composición del estiércol.

Entre los reportes encontrados en la literatura sobre el tema está el estudio de Erdman & Reddy (1987) quienes produjeron un alimento para rumiantes rico en nitrógeno, mediante la fermentación de desechos de aves de corral, cerdos, ganado de engorda y suero de queso con los microorganismos presentes en los residuos.

Como ejemplo de estudios enfocados a la producción de proteína unicelular para el enriquecimiento de alimentos balanceados para animales están: la fermentación de residuos de vaina y pulpa de calabaza con *Saccharomyces cerevisiae* (Essien *et al.*, 1992) y la fermentación del bagazo de caña de azúcar con *Candida tropicalis* (Pessoa *et al.*, 1996).

También se cita el estudio de Kaur & Saxena (2004), quienes generaron un alimento para peces, al mezclar residuos de malta provenientes de la fabricación de la cerveza con desechos de aves de corral y estiércol de vacas.

MARCO REGULATORIO SOBRE RESIDUOS COMO CONTAMINANTES DEL MEDIO AMBIENTE

El marco regulatorio en México enfocado al problema de residuos lo conforma la Ley General de Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR), publicada en el Diario Oficial de la Federación el 08 de octubre de 2003. Sus disposiciones tienen por objeto garantizar el derecho a toda persona a un medio ambiente adecuado y propiciar el desarrollo sustentable a través de

la prevención de la generación, la valorización y la gestión integral de los residuos peligrosos, residuos sólidos urbanos y residuos de manejo especial; así como prevenir la contaminación de sitios por la disposición de residuos y llevar a cabo su remediación.

Los residuos generados por actividades pesqueras, agrícolas, forestales, avícolas, ganaderas, incluyendo los residuos de los insumos utilizados en estas actividades, la LGPGIR los clasifica como residuos de manejo especial (artículo 19, fracción III). Los cuales están definidos como aquellos generados en los procesos productivos que no reúnen las características para ser considerados como peligrosos o como residuos sólidos urbanos (artículo 5 fracción XXX). La LGPGIR, como base del marco regulatorio en materia de residuos incluye también aspectos importantes, como el aprovechamiento de residuos (artículo 5 fracción II), el manejo integral (artículo 5 fracción XVII), el plan de manejo (artículo 5 fracción XXI) y la valorización (artículo 5 fracción XLIV).

A partir de lo anterior, se puede establecer que México cuenta con un marco legal a nivel federal para el aprovechamiento de residuos agroindustriales, lo que hace falta es crear las normas ambientales correspondientes, así como las leyes estatales para el manejo de los residuos.

En países de Centro y Sudamérica, la problemática de los residuos es el resultado de un incremento en la capacidad de producción que a su vez está ligada a un aumento en la generación de subproductos y

residuos, además del surgimiento de leyes ambientales cada vez más estrictas, lo cual ha llevado a la necesidad de gestionar residuos o buscar alternativas para su eliminación.

Respecto a las políticas internacionales aplicables al tema, es importante mencionar que un proceso biotecnológico que se pretende implementar para el aprovechamiento de un subproducto o residuo deberá ser menos contaminante que aquel que le dio origen, según las políticas establecidas en la norma NMX-SAST-004-IMNC-2004 que se refiere al sistema de administración de responsabilidad social.

Por otra parte, al considerar el aprovechamiento de un subproducto o residuo como materia prima, con fines de evitar un daño al ambiente, el proceso deberá cumplir con los requisitos establecidos en la norma NMX-SAA-14020-IMNC-2004, que refiere a un producto "verde" como aquel que se haya producido a partir del uso eficiente de la energía, del agua, así como de los diferentes insumos o materias primas; que el material pueda ser reciclado o reutilizable; que los desechos sean susceptibles de ser tratados mediante composteo y que sea biodegradable. Los atributos ambientales de los productos finales deberán ser consistentes con las expectativas de los productores y los consumidores o usuarios.

ASPECTOS DE CONTAMINACIÓN DE SUELO Y SUBSUELO POR PRESENCIA DE RESIDUOS

Cuando los residuos agroindustriales son dispuestos sobre el suelo sin ningún tratamiento previo y permanecen a la intemperie, su descomposición los puede convertir en residuos peligrosos principalmente por la presencia de agentes infecciosos, por el daño que pudieran causar a humanos, animales y a los recursos naturales. Si no se aplicaron medidas de remediación oportunamente el problema de contaminación se convierte en un pasivo ambiental y como consecuencia se puede presentar la dispersión de contaminantes. Al respecto, el Reglamento de la LGPGIR, en su artículo 132 establece la obligación de remediar un sitio contaminado. La vigilancia del cumplimiento de estos instrumentos regulatorios en México, es realizado por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).

Los problemas de dispersión de contaminantes derivados de la disposición de residuos a la intemperie pueden afectar directamente a los recursos naturales: suelo, agua y aire, además de plantas y animales de los alrededores. El daño que pudieran ocasionar dichos residuos está en función de sus características físicas, químicas y biológicas. Si el residuo contiene carbohidratos, los microorganismos propios del suelo y aquellos presentes de manera natural en el residuo iniciarán su degradación, si por el proceso microbiano que se inicia se generan lixiviados, éstos migrarán en forma vertical hacia el subsuelo y podrían alcanzar los mantos acuíferos; además, los microorganismos presentes podrían ser arrastrados por las corrientes de

aire para ser depositados en otros sitios. Si la degradación natural que se inicia es promovida por bacterias anaerobias pudieran generarse malos olores.

TRATAMIENTO DE DESECHOS

Cuando en un sitio se estuvieron depositando por mucho tiempo subproductos o residuos agroindustriales que no fueron aprovechados en su momento y que por lo tanto ya perdieron sus cualidades, éstos se convierten en desechos. Si el material tiene cierto contenido de materia orgánica, pero prevalecen condiciones insalubres, será mejor estabilizar el material como si se tratara de biosólidos y considerar su aprovechamiento como mejoradores o acondicionadores de suelos. Si este fuera el caso y previo acuerdo con la autoridad ambiental, se podría adoptar la norma oficial mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002 para definir los límites máximos permisibles de contaminantes, que básicamente incluyen metales (arsénico, cadmio, cromo, cobre, plomo, mercurio, níquel y zinc), así como patógenos (coliformes fecales y *Salmonella*) y parásitos (huevos de helminto). Si el desecho ya no es susceptible de ningún aprovechamiento entonces procede su disposición final en un sitio controlado que cumpla con las especificaciones que establece la norma oficial mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003.

Si no existen condiciones insalubres en el desecho y éste todavía contiene materiales susceptibles de ser utilizados, se puede proceder a la aplicación de hongos, particularmente de los géneros *Thricoderma*,

Phanerochaete y *Pleurotus*, que produzcan enzimas extracelulares como: celulasas, beta-glucosidasas, peroxidadas y lacasas, que sean capaces de degradar los sustratos complejos bajo las condiciones que prevalecen en el sitio, considerando que el material se encuentra en forma semisólida sobre el suelo y a la intemperie, por lo tanto está expuesto a condiciones no controladas que pudieran llegar a ser extremas como los cambios día/noche, calor/frío, sol/lluvia. Un aspecto adicional es que independientemente del tratamiento que se aplique, los costos deberán ser mínimos, por el hecho de que no se va a generar algún producto con valor agregado, solamente son acciones de protección ambiental. Una vez tratado el material se podrá utilizar como mejorador o acondicionador de suelos.

BIORREMEDIACIÓN DE SUELOS QUE FUERON CONTAMINADOS POR LA DISPOSICIÓN DE DESECHOS AGROINDUSTRIALES

Para proceder con la biorremediación de un suelo que fue contaminado por la disposición de subproductos, residuos o desechos agroindustriales, primeramente se deberá hacer un estudio de caracterización del sitio, para identificar los recursos naturales que fueron afectados, determinar la magnitud del daño y evaluar el riesgo que constituye el problema de contaminación. Será necesario conocer las características de los materiales que fueron depositados, sus componentes principales y los detalles del proceso que los generó para definir los parámetros indicadores que deberán ser

analizados. Aunque no existe en México un marco normativo específico para este tipo de contaminación, se pueden tomar como base diferentes documentos normativos y el criterio de experto, a partir de lo cual serían considerados los siguientes parámetros:

- Parámetros químicos
 - o pH.
 - o Compuestos orgánicos: plaguicidas en general, bifenilos policlorados, dioxinas/furanos, compuestos aromáticos polinucleares.
 - o Metales pesados en el material sólido: arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y vanadio.
 - o Compuestos lixiviables: nitrógeno amoniacal, nitritos/nitratos, cloruros, materia orgánica disuelta, sustancias activas al azul de metileno (este último para cuantificar presencia de surfactantes), además de los mismos metales pesados que se enlistaron en el punto anterior.
- Parámetros biológicos
 - o Microorganismos patógenos a humanos y animales
 - o Huevos de helminto

Una vez definidos los parámetros por analizar será necesario elaborar un plan de muestreo para definir la distribución de los puntos de muestreo en el plano horizontal, obtener muestras de suelo a diferentes profundidades y si existe un manto freático, norias o pozos en los alrededores, obtener también muestras de agua subterránea para

identificar la presencia de los compuestos lixiviables. De todos los parámetros referidos solamente existen valores de referencia para el pH (NOM-021-SEMARNAT-2000), para los bifenilos policlorados (NOM-133-SEMARNAT-2000), para algunos compuestos aromáticos polinucleares (NOM-138-SEMARNAT/SS-2003) y para los metales (NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2007), sin embargo, éstos podrán ser utilizados previo acuerdo con la autoridad ambiental. Otra opción que también puede resultar de un acuerdo con la autoridad ambiental es realizar una evaluación de riesgo a la salud y al ambiente, estableciendo criterios propios en función de las particularidades del sitio.

Lo que se espera del estudio de caracterización es tener una "radiografía" del sitio que permita interpretar en forma tridimensional, la magnitud de la afectación y el tipo de contaminantes presentes, a partir de esto se podrán determinar las alternativas de tratamiento que se pueden aplicar al suelo y en su caso, al agua subterránea.

CONSIDERACIONES FINALES

Tomando como marco de referencia los conceptos de sostenibilidad que se manejan a nivel internacional, los estudios que se realicen y las biotecnologías que se desarrollen deberán haber evaluado el impacto ambiental de todos los residuos, los que se reutilicen en forma directa como materia prima, o bien, los que se generen de la extracción de la materia prima, así como

aquellos resultantes de todas y cada una de las operaciones involucradas. Para evaluar el impacto ambiental se deberán considerar todos los insumos y servicios que se requieren y sus características para identificar los recursos naturales que se verían afectados, es decir, suelo, agua y aire. También se deberán identificar los residuos que pueden ser reutilizados y los que requieren un manejo o tratamiento específico para su disposición final. La metodología para dicha evaluación es conocida a nivel internacional como “análisis de ciclo de vida”, los principios generales de aplicación están establecidos en la serie de normas ISO 14040:1997, que forman parte de los estándares enfocados a la administración o gestión ambiental. Sólo de esta manera se podrá asegurar que el manejo de residuos se hará en forma sostenible.

De la revisión realizada, se puede establecer que la mayor parte de los estudios biotecnológicos para el aprovechamiento de residuos se queda a nivel de laboratorio, no se experimenta el escalamiento, ni la separación o recuperación del producto. Es muy importante considerar estas operaciones para poder visualizar un esquema completo del proceso que se pretende desarrollar y con ello identificar los impactos ambientales de los residuos provenientes de cada parte de un proceso.

En el tema de biocombustibles, es importante mencionar la necesidad de hacer un análisis riguroso y profundo sobre el enfoque que se debe dar a las investigaciones, primero, para no caer en el error de utilizar como materia prima cultivos

que compitan con alimentos (Viniestra, 2008), que demanden agua, que consuman energía y que generen más residuos; y segundo, considerar que si ya se tiene un camino recorrido que se refleja por el sinnúmero de publicaciones que circulan a nivel mundial, cualquier esfuerzo que se realice debe partir de los avances actuales, pero no de cero, no vale la pena repetir experiencias que no condujeron al éxito. Como especialistas, debemos demostrar que para el caso de México los esfuerzos deben ir dirigidos hacia el aprovechamiento de residuos lignocelulósicos en general (Martínez, 2010) y de residuos orgánicos de origen urbano (Saucedo, 2010), además de integrar biotecnólogos experimentados en todas las acciones gubernamentales y voluntades políticas que se pretendan emprender. Vale la pena leer y analizar la literatura oficial que conforma el marco regulatorio para la producción de biocombustibles en México.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Lic. Guillermina Sánchez su apoyo para tener el acceso a las bases de datos, a la Q.F.B. Lorena Vilchis Rodríguez su participación activa en la revisión de los artículos de donde se extrajo la información y a la M. en C. Diana García Aguirre por su apoyo en la revisión del escrito.

REFERENCIAS

- Abdel-Sater M A & El-Said A H M (2001)
Xylan-decomposing fungi and
xylanolytic activity in agricultural and

- industrial wastes. *Int. Biodet. Biodeg.* 47(1): 15-21.
- Aburto J, Martínez T & Murrieta F (2008) Evaluación técnico-económica de la producción de bioetanol a partir de residuos lignocelulósicos. *Tecnol. Ciencia Ed. (IMIQ)* 23(1): 23-30.
- Acuerdo por el que se emiten los Lineamientos para el otorgamiento de permisos para la producción, el almacenamiento, el transporte y la comercialización de bioenergéticos del tipo etanol anhidro y biodiesel. Diario Oficial de la Federación, 13 de noviembre de 2009, 25 pp.
- Acuerdo por el que se emiten los formatos de solicitudes de permisos para la producción, el almacenamiento, el transporte y la comercialización de bioenergéticos del tipo etanol anhidro y biodiesel. Diario Oficial de la Federación, 13 de noviembre de 2009, 12 pp.
- Acuerdo mediante el cual se delega en el Subsecretario de Planeación Energética y Desarrollo Tecnológico, las facultades a que hace referencia el artículo 12 de la ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos. Diario Oficial de la Federación, 20 de marzo de 2009, 3 pp.
- Arantes V, Silva E M & Milagres A M F (2011) Optimal recovery process conditions for manganese peroxidase obtained by solid-state fermentation of eucalyptus residue using *Lentinula edodes*. *Biomass and Bioenergy* 35(9): 4040-4044.
- Arriaga S, Rosas I, Alatraste-Mondragón F & Razo-Flores E (2011) Continuous production of hydrogen from oat Straw hydrolysis in a biotrickling filter. *Int. J. Hydrogen Energy* 36: 3442-3449.
- Atabani A E, Silitonga A S, Badruddin I A, Mahlia T M I, Masjuki H H & Mekhilef S (2012) A comprehensive review on diesel as an alternative energy resource and its characteristics. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 16: 2070-2093.
- Baca M T, Fornasier F & de Nobili M (1992) Mineralization and humification pathways in two composting processes applied to cotton wastes. *J. Ferment. Bioeng.* 74(3): 179-184.
- Becerra P L A (2010) La industria del etanol en México. *Economía UNAM* 16(6): 82-98.
- Benito M, Masaguer A, De Antonio R & Moliner A (2005) Use of pruning waste compost as a component in soilless growing media. *Biores. Technol.* 96(5): 597-603.
- Blancas A, Alpizar L, Larios G, Saval S & Huitron C (1982) Conversion of henequen pulp to microbial biomass by submerged fermentation. *Biotechnol. Bioeng. Symp.* 12: 171-175.
- BNDES (Banco Nacional de Desenvolvimento Economico e Social) (2008) Bioetanol de caña de azúcar: energía para el desarrollo sostenible, 320 p.

- Bosco F & Chiampo F (2010) Production of polyhydroxyalcanoates (PHAs) using milk whey and dairy wastewater activated sludge. Production of bioplastics using dairy residues. *J. Biosci. Bioeng.* 109(4): 418-421.
- Botella C, Ory I, Webb C, Cantero D & Blandino A (2005) Hydrolytic enzyme production by *Aspergillus awamori* on grape pomace. *Biochem. Eng. J.* 26(2-3): 100-106.
- Bouزيد O, Navarro D, Roche M, Asther M, Haon M, Delattre M, Lorquin J, Labat M, Asther M & Lesage-Meessen L (2005) Fungal enzymes as a powerful tool to release simple phenolic compounds from olive oil by-product. *Proc. Biochem.* 40(5): 1855-1862.
- Buitrón G & Carvajal C (2010) Biohydrogen production from Tequila vinasses in an anaerobic sequencing batch reactor: Effect of initial substrate concentration, temperature and hydraulic retention time. *Biores. Technol.* 101: 9071-9077.
- Bustamante M A, Paredes C, Moral R, Agulló E, Pérez-Murcia M D & Abad M (2008a) Composts from distillery wastes as peat substitutes for transplant production. *Res. Conserv. Recycl.* 52(5): 792-799.
- Bustamante M A, Paredes C, Marhuenda-Egea F C, Pérez-Espinosa A, Bernal M P & Moral R (2008b). Co-composting of distillery wastes with animal manures: Carbon and nitrogen transformations in the evaluation of compost stability. *Chemosphere* 72(4): 551-557.
- Carreón R O E, Sabido R L A, Centeno L S, Leal R L J, Martínez J A & Fernández S M T (2009) Etanol carburante. *BioTecnología* 13(3): 79-102.
- Castilho L R, Medronho R A & Alves T L M (2000) Production and extraction of pectinases obtained by solid state fermentation of agroindustrial residues with *Aspergillus niger*. *Biores. Technol.* 71(1): 45-50.
- Castro C, Zuluaga R, Putaux J C, Caro G, Mondragon I & Gañán P (2011) Structural characterization of bacterial cellulose produced by *Gluconacetobacter swingsii* sp. from Colombian agroindustrial wastes. *Carboh. Polym.* 84(1): 96-102.
- Chang A C C, Ying-Hsuan T, Ming-Hsiang H, Chyi-How L & Chiu-Yue L (2011) Hydrogen production by the anaerobic fermentation from acid hydrolyzed rice straw hydrolysate. *Int. J. Hydrogen Energy* 36(21): 14280-14288.
- Comisión Intersecretarial para el Desarrollo de los Bioenergéticos (2008) Los Bioenergéticos en México, SENER, SEMARNAT, SAGARPA, SHCP, SE, 13 pp.
- Comisión Intersecretarial para el Desarrollo de los Bioenergéticos (2009) Estrategia Intersecretarial de los Bienergéticos, SENER,

- SEMARNAT, SAGARPA, SHCP, SE, 29 pp.
- Cuervo L, Folch J L & Quiroz R E (2009) Lignocelulosa como fuente de azúcares para la producción de etanol. *BioTecnología* 13(3): 11-25.
- Decreto por el cual se aprueba el Programa Especial para el Aprovechamiento de Energías Renovables 2009-2012. Diario Oficial de la Federación, 06 de agosto de 2009, pp 10-57.
- Dareioti M A, Dokianakis S N, Stamatelatos K, Zafiri C & Kornaros M (2009) Biogas production from anaerobic co-digestion of agroindustrial wastewaters under mesophilic conditions in a two-stage process. *Desalination* 248(1-3): 891-906.
- Dávila-Vázquez G, Alatraste-Mondragon F, de Leon-Rodriguez A & Razo-Flores E (2008a) Fermentative hydrogen production in batch experiments using lactose, cheese whey and glucose: Influence of initial substrate concentration and pH. *Int. J. Hydrogen Energy* 33: 4989-4997.
- Dávila-Vázquez G, Arriaga S, Alatraste-Mondragón F, De León-Rodríguez A, Rosales-Colunga L M & Razo-Flores E (2008b) Fermentative biohydrogen production: trends and perspectives. *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.* 7: 27-45.
- Dávila-Vázquez G, Cota-Navarro C B, Rosales-Colunga L M, de Leon-Rodriguez A & Razo-Flores E (2009) Continuous biohydrogen production using cheese whey: Improving the hydrogen production rate. *Int. J. Hydrogen Energy* 34: 4296-4304.
- Dávila-Vázquez G & Razo-Flores E (2007) Producción biológica de hidrógeno por vía fermentativa: Fundamentos y perspectivas. *BioTecnología* 11(3): 19-27.
- Erdman M D & Reddy C A (1987) Batch fermentation of cheese-whey supplemented poultry, swine and cattle waste filtrates. *Biol. Wastes* 22(1): 23-37.
- El Hage R, Chrusciel L, Desharnais L & Brosse N (2010) Effect of autolysis of *Miscanthus x giganteus* on lignin structure and organosolv delignification. *Biores. Technol.* 101(23): 9321-9329.
- Essien A I, Ebana R U B & Udo H B (1992) Chemical evaluation of the pod and of the fluted pumpkin (*Telfairia occidentalis*) fruit. *Food Chem.* 45(3): 175-178.
- Fanchini C R, Temer B, Teixeira M C & Cano E (2010) Production of xylanolytic enzymes by *Penicillium janczewskii*. *Biores. Technol.* 101(11): 4139-4143.
- Garcia-Gomez A, Bernal M P & Roig A (2002) Growth of ornamental plants in two composts prepared from agroindustrial wastes. *Biores. Technol.* 83(2): 81-87.
- Godoy M G, Gutarra M L E, Maciel F M, Felix S P, Bevilacqua J V, Machado O L T & Freire D M G (2009) Use of a

Artículos

- low-cost methodology for biodegradation of castor bean waste and lipase production. *Enz. Microb. Technol.* 44(5): 317-322.
- Gog A, Roman M, Tosa M, Paizs C & Irimie (2012) Biodiesel production using enzymatic transesterification – Current state and perspectives. *Renewable Energy* 39: 10-16.
- Guimarães L H, Terenzi H F, Teixeira M L & Atílio J J (2007) Production and characterization of a thermostable extracellular D-fructofuranosidase produced by *Aspergillus ochraceus* with agroindustrial residues as carbon sources. *Enz. Microb. Technol.* 42(1): 52-57.
- Helwani Z, Othman M R, Aziz N, Fernando W J N & Kim J (2009) Technologies for production of biodiesel focusing on green catalytic techniques: A review. *Fuel Process. Technol.* 90: 1502-1514.
- Herrera F, Castillo J E, Chica A F & López Bellido L (2008) Use of municipal solid waste compost (MSWC) as a growing medium in the nursery production of tomato plants. *Biores. Technol.* 99(2): 287-296.
- Huitrón C, Saval S & Acuña M E (1984) Production of microbial enzymes from agro-industrial by-products. *Enz. Eng.* 7: 110-114.
- ISO 14040:1997. Environmental management–Life cycle assessment –Goal and scope definition and inventory analysis. International Standard Organization.
- Kaur V I & Saxena P K (2004) Incorporation of brewery waste in supplementary feed and its impact on growth in some carps. *Biores. Technol.* 91(1): 101-104.
- Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos (2008). Diario Oficial de la Federación, 01 de febrero de 2008, 10 pp.
- Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) (2007). Diario Oficial de la Federación, 08 de octubre de 2003, última reforma publicada en el Diario Oficial de la Federación el 19 de junio de 2007, 42 pp.
- Lin L, Cunshan Z, Vittayapadung S, Xiangqian S & Mingdong D (2011) Opportunities and Challenges for biodiesel fuel. *App. Energy* 88: 1020-1031.
- Lopez-Mondejar R, Bernal-Vicente A, Ros M, Tittarelli F, Canali S, Intrigliolo F & Pascual J A (2010) Utilisation of citrus compost-based growing media amended with *Trichoderma harzianum* T-78 in *Cucumis melo* L. seedling production. *Biores. Technol.* 101(10): 3718-3723.
- Loss E, Royer A R, Barreto-Rodrigues M & Barana A C (2009) Use of maize wastewater for the cultivation of the *Pleurotus* spp. mushroom and optimization of its biological efficiency. *J. Haz. Mat.* 166(2-3): 1522-1525.
- Luque R, Herrero-Avila L, Campelo J M, Clark J H, Hidalgo J M, Luna D,

Artículos

- Marinas J M & Romero A A (2008). Biofuels: a technological perspective. *Energy & Environ. Sci.* 1(5): 513-596.
- Madejón E, López R, Murillo J M & Cabrera F (2001) Agricultural use of three (sugar-beet) vinasse composts: effect on crops and chemical properties of a Cambisol soil in the Guadalquivir river valley (SW Spain). *Agric. Ecosyst. Environ.* 84(1): 55-65.
- Manios (2004) The composting potential of different organic solid wastes: experience from the island of Crete. *Environ. Int.* 29(8): 1079-1089.
- Marchal R, Ropars M, Pourquié J, Fayolle F & Vandecasteele JP (1992) Large-Scale Enzymatic Hydrolysis of Agricultural Lignocellulosic Biomass. Part 2: Conversion into Acetone-Butanol. *Biores. Technol.* 42: 205-217.
- Martínez J A (2010) Las futuras refinerías están basadas en procesos biotecnológicos. *BioTecnología* 14(3): 4-5.
- Mbagwu J S C & Ekwealor G C (1990) Agronomic potential of brewers' spent grains. *Biol. Wastes* 34(4): 335-347.
- Mussatto S I, Aguilar C N, Rodrigues L R & Teixeira J A (2009) Fructo-oligosaccharides and B-fructofuranosidase production by *Aspergillus japonicus* immobilized on lignocellulosic materials. *J. Mol. Cat. B: Enzymatic* 59(1-3): 76-81.
- Nath A, Dixit M, Bandiya A, Chavda S & Desai A J (2008) Enhanced PHB production and scale up studies using cheese whey in fed batch culture of *Methylobacterium* sp ZP24. *Biores. Technol.* 99(13): 5749-5755.
- Nitschke M & Pastore G M (2006) Production and properties of a surfactant obtained from *Bacillus subtilis* grown on cassava wastewater. *Biores. Technol.* 97(2): 336-341.
- NMX-SAST-004-IMNC-2004. Norma Mexicana "Sistema de Administración de Responsabilidad Social para todos los procesos fundamentales de la empresa que incluyen Dirección, Realización, Gestión de Recursos, Comunicación, Medición, Análisis y mejora".
- NMX-SAA-14020-IMNC-2004. Norma Mexicana "Etiquetas y declaraciones ambientales – principios generales".
- Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002 (2003) Protección ambiental.- Lodos y biosólidos.- Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. Diario Oficial de la Federación, 15 de agosto de 2003, pp 18-60.
- Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 (2002) Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. Diario Oficial de la Federación, 31 de diciembre de 2002, pp 1-85.
- Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003 (2004) Especificaciones de protección

- ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial. *Diario Oficial de la Federación*, 20 de octubre de 2004, pp 1-16.
- Norma Oficial Mexicana NOM-133-SEMARNAT-2000 (2001) Protección Ambiental - Bifenilos policlorados (BPCs) - Especificaciones de manejo. *Diario Oficial de la Federación*, 10 de diciembre de 2001.
- Norma Oficial Mexicana NOM-138-SEMARNAT/SS-2003 (2005) Límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y las especificaciones para su caracterización y remediación. *Diario Oficial de la Federación*, 30 de marzo de 2005, pp 25-43.
- Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (2007) Que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio. *Diario Oficial de la Federación*, 02 de marzo de 2007.
- Obeta U J, Harvey L M & McNeil B (2007) Linamarase activities in *Bacillus* spp. responsible for thermophilic aerobic digestion of agricultural wastes for animal nutrition. *Waste Management* 27(11): 1501-1508.
- Oliveira A S, Gomez R J H C & Haully M C O (1996) Lactic acid production by biodegradation of agroindustrial residues. *Int. Biodeter. Biodeg.* 37(1-2): 113.
- Oliveira L A, Porto A L F & Tambourgi E B (2006) Production of xylanase and protease by *Penicillium janthinellum* CRC 87M-115 from different agricultural wastes. *Biores. Technol.* 97(6): 862-867.
- Oliveira F J S, Vazquez L, Campos N P & França F P (2009) Production of rhamnolipids by a *Pseudomonas alcaligenes* strain. *Proc. Biochem.* 44(4): 383-389.
- Oliverio J L & Hilst A G P (2004) DHR – Dedini Rapid Hydrolysis Revolutionary process for producing alcohol from sugarcane bagasse. *Int. Sugar J.* 106: 169-171.
- Ostos J C, López-Garrido R, Murillo J M & López R (2008) Substitution of peat for municipal solid waste- and sewage sludge-based composts in nursery growing media: Effects on growth and nutrition of the native shrub *Pistacia lentiscus* L. *Biores. Technol.* 99(6): 1793-1800.
- Parawira W, Murto M, Read J S & Mattiasson B (2005) Profile of hydrolases and biogas production during two-stage mesophilic anaerobic digestion of solid potato waste. *Proc. Biochem.* 40(9): 2945-2952.

- Parawira W, Read J S, Mattiasson B & Björnsson L (2008) Energy production from agricultural residues: High methane yields in pilot-scale two-stage anaerobic digestion. *Biomass Bioenergy* 32(1): 44-50.
- Pessoa Jr A, Mancilha I M & Sato S (1996). Cultivation of *Candida tropicalis* in sugar cane hemicellulosic hydrolyzate for microbial protein production. *J. Biotechnol.* 51(1): 83-88.
- Povolo S, Toffano P, Basaglia M & Casella S (2010) Polyhydroxyalkanoates production by engineered *Cupriavidus necator* from waste material containing lactose. *Biores. Technol.* 101(20): 7902-7907.
- Rai S K, Konwarh R & Mukherjee A K (2009) Purification, characterization and biotechnological application of an alkaline-keratinase produced by *Bacillus subtilis* RM-01 in solid-state fermentation using chicken-feather as substrate. *Biochem. Eng. J.* 45(3): 218-225.
- Reglamento de la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos (2009). Diario Oficial de la Federación, 18 de junio de 2009, 20 pp.
- Reglamento de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (RLGPGIR) (2006) Diario Oficial de la Federación, 30 de noviembre de 2006, 38 pp.
- Ribeiro H M, Romero A M, Pereira H, Borges P, Cabral F, & Vasconcelos E (2007) Evaluation of a compost obtained from forestry wastes and solid phase of pig slurry as a substrate for seedlings production. *Biores. Technol.* 98(17): 3294-3297.
- Rodríguez O V & Hansen H (2007) Obtención de dextrano y fructosa, utilizando residuos agroindustriales con la cepa *Leuconostoc mesenteroides* NRRL B512-F. *Revista de la Escuela de Ingeniería de Antioquia, Medellín (Colombia)* 7: 159-172.
- Rosales-Colunga L M, Razo-Flores E, Ordoñez L G, Alatríste-Mondragón F & De León-Rodríguez A (2010) Hydrogen production by *Escherichia coli* Δ hycA Δ lacI using cheese whey as substrate. *Int. J. Hydrogen Energy* 35: 491-499.
- Sánchez-Monedero M A, Cayuela M L, Mondini C, Serramiá N & Roig A (2008) Potential of olive mill wastes for soil C sequestration. *Waste Management* 28(4): 767-773.
- Sánchez-Monedero M A, Serramiá N, García-Ortíz C C, Fernández-Hernández A & Roig A (2010) Greenhouse gas emissions during composting of two-phase olive mill wastes with different agroindustrial by-products. *Chemosphere* 81(1): 18-25.
- Sandoval C J, Vergara M, Carreño M & Castillo E F (2009) Microbiological characterization and specific methanogenic activity of anaerobe sludges used in urban solid waste

- treatment. *Waste Management* 29(2): 704-711.
- Sans C, Mata-Alvarez J, Cecchi F, Pavan P & Bassetti A (1995) Volatile fatty acids production by mesophilic fermentation of mechanically-sorted urban organic wastes in a plug-flow reactor. *Biores. Technol.* 51(1): 89-96.
- Saucedo G (2010) La oportunidad de la Biotecnología y la Bioingeniería frente a los residuos de las grandes ciudades. *BioTecnología* 14(2): 4-5.
- Saval S, Solorzano R, Alpizar L, Cea A & Huitron C (1982) Production of pectinases by submerged fermentation of henequen pulp. *In Use of Enzymes in Food Technology*, Ed. P. Dupuy, Versailles, France, pp. 531-535.
- Saval S & Huitron C (1983) Microbial pectinases from henequen pulp. *Dev. Ind. Microbiol.* 24: 547-551.
- Saval S, Solórzano R, Alpizar L, Cea A & Huitrón C (1983) Producción de pectinasas a partir de pulpa de henequén. *En Biotecnología de Enzimas*, Ed. C. Huitrón, UNAM, CONACyT, OEA, México, pp. 203-215.
- Secretaría de Energía (2008) Programa de Introducción de Bioenergéticos, 39 pp.
- Secretaría de Energía (2009) Energías renovables para el desarrollo sustentable en México, con el apoyo de GTZ, 70 pp.
- Sobrinho H B S, Rufino R D, Luna J M, Salgueiro A A, Campos-Takaki G M, Leite L F C & Sarubbo L A (2008) Utilization of two agroindustrial by-products for the production of a surfactant by *Candida sphaerica* UCP0995. *Proc. Biochem.* 43(9): 912-917.
- Suvarna L G, Subba R C, Sreenivas R R, Hobbs P J & Shetty P R (2009) Enhanced production of xylanase by a newly isolated *Aspergillus terreus* under solid state fermentation using palm industrial waste: A statistical optimization. *Biochem. Eng. J.* 48(1): 51-57.
- Takagi M, Abe S, Suzuki S, Emert G H, & Yata N (1977) A method for production of alcohol directly from cellulose using cellulose and yeast. *Proc. Bioconversion Symp., ITT Delhi* 551-571.
- Thanapimmentha A, Luadsongkram A, Titapiwatanakun B & Srinophakun P (2012) Value added waste of *Jatropha curcas* residue: Optimization of protease production in solid state fermentation by Taguchi DOE methodology. *Ind. Crops Prods.* 37(1): 1-5.
- Tosun I, Gönüllü M T, Arslankaya E & Günay A (2008) Co-composting kinetics of rose processing waste with OFMSW. *Biores. Technol.* 99(14): 6143-6149.
- Valdez-Vazquez I, Acevedo-Benitez J A & Hernandez-Santiago C (2010) Distribution and potential of

Artículos

- bioenergy resources from agricultural activities in Mexico. *Renew. Sust. Energy Rev.* 14: 2147-2153.
- Viniegra G (2008) Los biocombustibles y la biotecnología de vanguardia. *BioTecnología* 12(1): 3-5.
- Yusuf N N A N, Kamarudin S K & Yaakub Z (2011). Overview on the current trends in biodiesel production. *Energy Conversion Management* 52: 2741-2751.
- Zervakis G, Yiatras P & Balis C (1996) Edible mushrooms from olive oil mill wastes. *Int. Biodet. Biodegr.* 38(3-4): 237-243.