



FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES

CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

“PRODUCCIÓN DE ENERGÍA LIMPIA MEDIANTE LA  
DEGRADACIÓN DE RESIDUOS ORGÁNICOS AGRÍCOLAS”

Trabajo de investigación para optar el Grado de Bachiller en:  
INGENIERÍA AMBIENTAL

Presentado por:

Jasmin Yairsa Vargas Solis: 0000-0002-7147-5009

Asesor:

Dr. Marcos Alejandro Sulca López: 0000-0001-9056-0068

Lima – Perú

2020

**RESOLUCIÓN DIRECTORAL ACADÉMICA DE CARRERA N°257-2020-DACIA-DAFCA-CIENTIFICA**

FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES / CARRERA DE INGENIERIA AMBIENTAL

Lima 26 de noviembre de 2020

**VISTO:**

La revisión realizada y la aprobación de Trabajo de Investigación titulado: **PRODUCCIÓN DE ENERGÍA LIMPIA MEDIANTE LA DEGRADACIÓN DE RESIDUOS ORGÁNICOS AGRÍCOLAS**, presentado por:

- **Jasmin Yairsa Vargas Solis**

**CONSIDERANDO:**

Que, de acuerdo al Reglamento General de la Universidad Científica del Sur y los reglamentos de pregrado para obtener el grado de Bachiller de **Ingeniería Ambiental** en la **Facultad de Ciencias Ambientales**, se debe desarrollar un trabajo de investigación.

Que, de acuerdo a la normativa vigente de la Universidad Científica del Sur, en uso de las atribuciones conferidas al Director Académico de Carrera.

**SE RESUELVE:**

Aprobar e inscribir el trabajo de investigación titulado: **PRODUCCIÓN DE ENERGÍA LIMPIA MEDIANTE LA DEGRADACIÓN DE RESIDUOS ORGÁNICOS AGRÍCOLAS** con N° de registro de la carrera: **089-FCA-IAM**.

Nombrar al docente/colaborador **Marcos Alejandro Sulca López** como asesor de dicho trabajo de investigación.

Regístrese, comuníquese y archívese,



**Mg. Gonzalo Francisco Flores Roca**  
Director Académico de Carrera  
Ingeniería Ambiental

**PRODUCCIÓN DE ENERGÍA LIMPIA MEDIANTE LA DEGRADACIÓN DE  
RESIDUOS ORGÁNICOS AGRÍCOLAS****PRODUCTION OF CLEAN ENERGY THROUGH THE DEGRADATION OF  
AGRICULTURAL ORGANIC WASTE**

Jasmin Yairisa Vargas Solis <sup>1</sup>; Marcos Alejandro Sulca López

<sup>1</sup> Facultad de Ciencias Ambientales, Universidad Científica del Sur, Lima, Perú.

[180000141@ucientifica.edu.pe](mailto:180000141@ucientifica.edu.pe) , [msulcal@ucientifica.edu.pe](mailto:msulcal@ucientifica.edu.pe)

**RESUMEN**

En la actualidad, la búsqueda de nuevas alternativas para la obtención de energía en relación a las ya convencionales, siendo principalmente la explotación del petróleo, predispone a la sociedad actual al reaprovechamiento de los residuos orgánicos como fuente renovable para la producción de biocombustibles, entre las cuales destaca la obtención del bioetanol. Ello ha nacido a partir de la necesidad de preservar los recursos, maximizar el uso potencial de los residuos agrícolas y sobre todo de proteger el ambiente. Los residuos derivados de la agricultura en un gran porcentaje corresponden a la biomasa lignocelulósica con alto contenido de hemicelulosa y celulosa entre un 76-80%, los cuales pese que es difícil su degradación, es posible la aplicación de métodos físicos, químicos y biológicos. Es por ello, que han surgido diversos estudios e investigaciones los cuales proponen diversas alternativas de solución a la latente problemática del inadecuado manejo de residuos. El presente trabajo, presenta una revisión de los diversos tipos de residuos derivados de la actividad agrícola, la composición de los principales cultivos generadores de residuos agrícolas, así como los aspectos ambientales y sanitarios derivados de su generación y producción, su gestión y manejo, y los métodos de producción de energía más limpia a partir de residuos orgánicos agrícolas. Finalmente, se determinó que la hidrólisis de residuos lignocelulósicos constituye una de las técnicas de mayor interés y uso en cuanto al reaprovechamiento de residuos orgánicos agrícolas, siendo esencial que se realicen más estudios respecto a la hidrólisis enzimática.

**Palabras clave:** energía limpia, residuos orgánicos agrícolas, biocombustibles.

**ABSTRACT**

Currently, the search for new alternatives to obtain energy in relation to the already conventional ones, being mainly the exploitation of oil, predisposes today's society to the reuse of organic waste as a renewable source for the production of biofuels, among the which highlights the obtaining of bioethanol. This was born from the need to preserve resources, maximize the potential use of

agricultural residues and above all to protect the environment. The residues derived from agriculture in a large percentage correspond to lignocellulosic biomass with a high content of hemicellulose and cellulose between 76-80%, which although its degradation is difficult, the application of physical, chemical and biological methods is possible. That is why various studies and investigations have emerged which propose various alternative solutions to the latent problem of inadequate waste management. This work presents a review of the various types of waste derived from agricultural activity, the composition of the main crops that generate agricultural waste, as well as the environmental and health aspects derived from their generation and production, their management and handling, and the methods of producing cleaner energy from organic agricultural waste. To sum up, it was determined that the hydrolysis of lignocellulosic residues constitutes one of the techniques of greatest interest and use regarding the reuse of agricultural organic residues, being essential that more studies are carried out regarding enzymatic hydrolysis.

**Keywords:** clean energy, organic agricultural waste, biofuels.

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la gestión de los diversos tipos de residuos constituye uno de los desafíos más grandes de la sociedad actual (Ramos y Terry, 2014). Los elevados costos para la disposición final de los residuos, hacen que estos se conviertan en un problema no solo económico sino también ambiental (Montoya *et al.*, 2008). Sin embargo, hay otras medidas de gestión más sostenibles y recomendables, tales como la disminución de los residuos que se generan, el reúso y reciclaje de estos; y la valoración energética.

La valorización energética de los residuos sólidos, es considerada como una fuente importante para el aprovechamiento y la generación de energía renovable. La quema de los residuos sólidos genera gases y componentes químicos los cuales pueden ser dañinos para el ambiente. No obstante, muchos autores (Castells, 2012; Castells *et al.*, 2012; Cruz y Ojeda, 2013) señalan que es un método alternativo renovable y limpio en todos sus aspectos. Asimismo, el hecho de que la población tome mayor conciencia ambiental, permite que el proceso de gestión de los residuos no sea un tema tan complicado. Sin embargo, el primer paso siempre va a consistir en cambiar el comportamiento, y los estilos de consumo y producción de la sociedad actual.

La valorización energética de los residuos, por lo general, se realiza mediante procesos de tratamiento biológico y térmico, siendo la incineración, la digestión anaerobia y la co-incineración, las tecnologías más probadas a nivel industrial. Por otra parte, existe una tendencia exponencial en la implementación de nuevas tecnologías para la generación de energía limpia tales como la

pirólisis y la gasificación, dado su alto rendimiento energético y por la poca aceptación social por los métodos como la incineración.

## **REVISIÓN TEÓRICA**

### **1.1. Residuo agrícolas**

#### **1.1.1. *Concepto de residuo agrícola***

Desde el punto de vista de la producción, un residuo agrícola es considerado como la fracción o fracciones que no forman parte de la siembra, el cual no es comercializable por cuestiones de calidad y aprovechamiento, por motivos extrínsecos o intrínsecos tales como enfermedades, estrés nutricional, estrés hídrico, entre otros (Moral y Moreno, 2008). Por lo general, estos residuos se generan a partir de las limpiezas que se realizan para el cuidado de las plantas contra las plagas, o restos de las cosechas. Es por ello que los tallos, frutos, raíces y hojas no aprovechables entran dentro de esta categoría, además de determinadas partes aéreas como las pajas de cereales y leguminosas, los cuales pueden ser incorporados al suelo o aprovechadas mediante métodos de valorización material o energético. Por otro lado, Cerda *et al.*, (1999), lo describen como aquellos residuos generados en el entorno natural integrado por un grupo variado de productos formados por las plantas o sus partes, los cuales es necesario separar para conseguir un producto agrícola dentro de las condiciones comercializables. Asimismo, la Agencia Europea de Medio Ambiente conceptualiza a los residuos agrícolas como aquellos que no pueden ser utilizados, ya sean de naturaleza sólida, líquida o que provengan de las actividades agrícolas. Este tipo de prácticas, aunque intuitivamente comprenden actividades eminentemente agrícolas como el cultivo de hortalizas, cereales y frutales, también comprende las actividades ganaderas, así como las actividades de transformación de productos agrícolas.

#### **1.1.2. *Tipos de los residuos agrícolas***

El concepto de agricultura ha sido siempre entendido como propia de actividades muy dependientes del medio físico natural, relacionándose estrechamente con el entorno suelo, clima y agua. La introducción de la técnica de monocultivos o cultivos forzados ha conseguido modificar parcial o totalmente las variables ambientales (Altieri y Nicholls, 2007), favoreciendo que los cultivos se desarrollen de manera independiente de los factores climáticos. Los residuos agrícolas están constituidos por materiales orgánicos (biomasa residual) e inorgánicos (envases y plásticos), tal como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. *Producción anual por hectárea de los principales residuos agrícolas generados en invernadero.*

Residuos agrícolas	Tipo de residuo	Cantidad
<b>Orgánicos</b>	Biomasa residual	29.1 t
	Sustratos	6.1 t
<b>Inorgánicos</b>	Plásticos de cubierta	1.05 t
	Envases fitosanitarios	66 envases
	Lixiviados	0.3 t (agua y agroquímicos)

Fuente: Encuentro Medioambiental Almirense. Grupo Ecologista Mediterráneo

Por otro lado, los residuos agrícolas se pueden clasificar como derivados de los procesos productivos, formados principalmente por restos de biomasa vegetal, insumos químicos empleados durante la etapa de crecimiento del cultivo, fertilizantes, plaguicidas, etc., así como residuos derivados de procesos industriales, compuesto principalmente por materia orgánica; y residuos sólidos como los envases plásticos.

### **1.1.3. Composición de los residuos agrícolas**

La primordial característica diferenciadora de los residuos agrícolas, es la presencia de la pared celular, el cual a su vez está constituida por macromoléculas que presentan un alto potencial nutricional y energético. La pared celular está estructurada como una matriz compleja en la que diferentes tipos de polímeros interactúan para formar una barrera que confiere protección a la célula y a la vez participa en los procesos de comunicación celular. Se pueden diferenciar dos tipos de pared celular: la primaria y la secundaria. La pared celular primaria es más delgada y rodea a las células en crecimiento, de manera que, a pesar de su fortaleza, permite la expansión de la célula. Por otro lado, la pared celular secundaria, más fuerte y gruesa, se forma cuando la célula ha finalizado su desarrollo y es portadora del mayor porcentaje de carbohidratos contenidos en los tejidos vegetales. La lámina media actúa como base para la formación de la pared celular y nexo de unión entre distintas células.

Los materiales lignocelulósicos por lo general están conformados por tres componentes: celulosa, hemicelulosa y lignina, los cuales se encuentran asociados para dar soporte a la estructura de la pared celular (Guarnizo *et al.*, 2009), pueden ser degradadas por enzimas como las celulasas y hemicelulasas (Almeida *et al.*, 2015) las cuales son producidas principalmente por algunas bacterias y hongos, dejando evidencia sus aplicaciones biotecnológicas en la transformación de materiales lignocelulósicos a productos de mayor valor agregado.

a) **La celulosa**

La hidrólisis de la celulosa da lugar a la celobiosa, la cual forma parte de la unidad estructural de esta. La repetición múltiple de estas unidades de celobiosa genera la formación de largas cadenas, que se enlazan a través de puentes de hidrógeno establecidos entre grupos hidroxilo y fuerzas de Van der Waals, formando así las denominadas fibrillas elementales que se unen formando las microfibrillas (Figura 1). En última instancia, la agrupación de estas microfibrillas da lugar a las fibrillas (García, 2003).

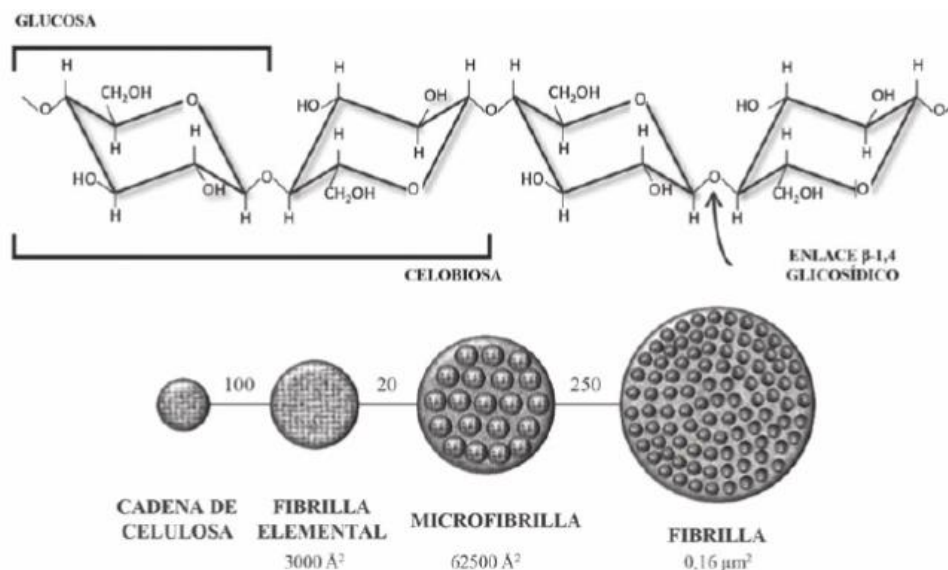


Figura 1. Estructura micro y macromolecular de la celulosa

Fuente: Red Española de Compostaje, 2014

Este polímero constituye una fuente limitada de carbono para los microorganismos, dado que los seres vivos no pueden obtener energía de la celulosa de manera directa, pero sí a partir de azúcares metabolizados por medio de la glucólisis; es por ello que si los organismos quieren hacer uso de los monómeros de azúcares es necesario forzar el desprendimiento de la celulosa de los monómeros, ya sea por medio de una hidrólisis química o biológica, esta última es llevada a cabo por complejos enzimáticos, correspondientes a enzimas del grupo de las hidrolasas (Almeida *et al.*, 2015).

b) **La hemicelulosa**

Es el segundo polisacárido más abundante presente en la naturaleza, el cual se agrupa en un conjunto de polímeros con diferentes estructuras (Polizeli *et al.*, 2005). La estructura básica mayoritaria (Figura 2) suele estar compuesta por una amplia variedad de azúcares de 5 y 6 carbonos unidos entre sí mediante enlaces glicosídicos (β-1,4 y, en menor medida, β-1,3). En función al tipo de azúcar dominante, se pueden diferenciar distintos tipos de hemicelulosas (Görgens *et al.*, 2010). Por ejemplo, el xilano, manano, β-glucano, arabinano y galactano los

cuales tienen como unidad fundamental la D-xilosa, D-manosa, D-glucosa, L-arabinosa y D-galactosa respectivamente.

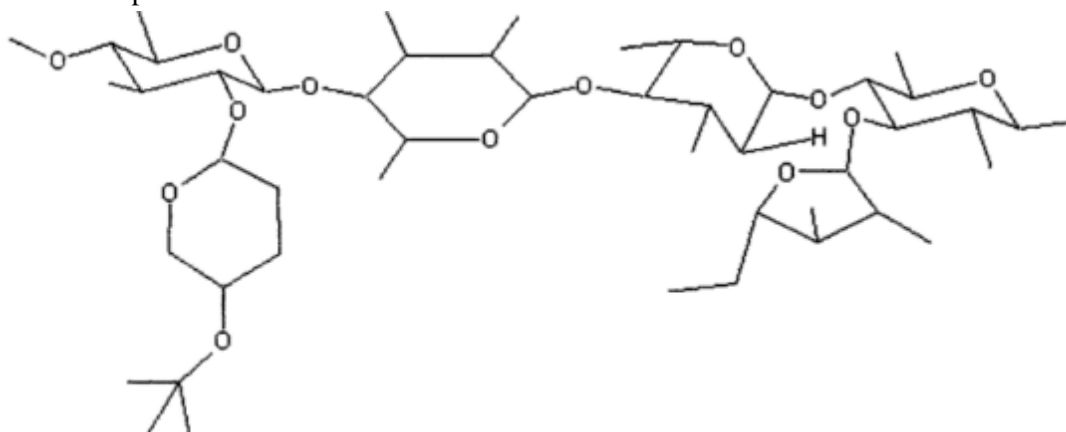


Figura 2. Estructura de la hemicelulosa

Fuente: Van Soest, 1982

### c) La lignina

La lignina es el tercer polímero más abundante en la tierra, detrás de la celulosa y hemicelulosa, y el segundo en plantas superiores, con un volumen estimado de  $3 \times 10^{11}$  toneladas (t), lo que supone aproximadamente el 30% del carbono orgánico presente en la biósfera (Aro *et al.*, 2005). El término hace referencia a un amplio grupo de polímeros de naturaleza aromática generados a partir de procesos oxidativos de acoplamiento de distintas unidades de 4- hidroxifenil propanoides (Boerjan *et al.*, 2004). Los más comunes corresponden a ácidos hidroxicinámicos o sus formas alcoholicas, entre las cuales destacan los alcoholes sinapílicos, coniferílico y en menor medida al cumarílico. La estructura de la lignina se muestra en la figura 3 presentada a continuación.

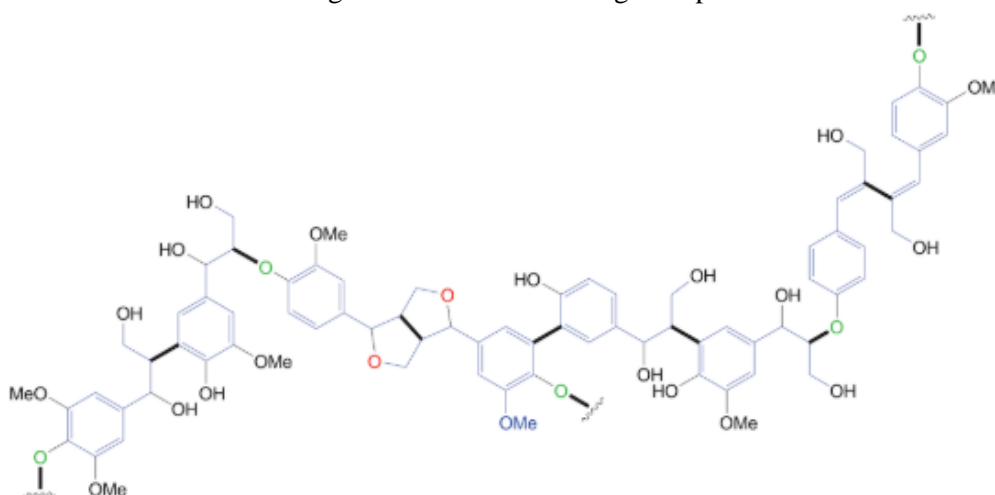


Figura 3. Fragmento de la estructura de la lignina

Fuente: Angeles, Concepción, Marta, y Gutiérrez, 2013



Aunque la distribución de estos componentes principales es variable, se puede decir que la composición porcentual oscila entre 30 -50% de celulosa, 20-40% de hemicelulosa, 15-25% de lignina y 5- 35% de otros componentes, tales como, proteínas y moléculas extraíbles. En la pared primaria la lignina puede llegar a constituir el 30% en especies de dicotiledóneas y monocotiledóneas del tipo no gramíneo y entre el 5-10% en las herbáceas. La variación en las proporciones en la que cada uno de los componentes principales de los tejidos vegetales se encuentra presente va a depender de la especie de planta, el tipo concreto de la célula y del grado de desarrollo que esté presente (Capek *et al.*, 2000; Keegstra y Pauly, 2010). Las especies pertenecientes al grupo de las angiospermas presentan en comparación de las clasificadas como gimnospermas, un contenido algo inferior de lignina y una mayor variabilidad en el porcentaje de celulosa (Tabla 2), mientras que la hemicelulosa suele estar presente en proporción similar. En tanto, las especies del grupo de las gramíneas muestran valores superiores de hemicelulosa e inferiores de celulosa, mostrando la lignina un amplio margen de variación (Liu *et al.*, 2012).

Tabla 2. *Composición porcentual de los polímeros lignocelulósicos en diferentes tipos de materiales vegetales*

Material lignocelulósico	Celulosa %	Hemicelulosa %	Lignina %
Álamo	49.9	25.1	18.1
Arce	44.9	23.0	20.7
Bagazo de caña de azúcar	40.0	27.0	10.0
Biomasa de olivo	25.2	15.8	19.1
Mazorca de maíz	36.4	22.6	16.6
Nogal	46.2	20.9	21.9
Paja de arroz	36.2	19.0	9.9
Paja de avena	39.4	27.1	17.5
Paja de cebada	33.8	21.9	13.8
Paja de centeno	37.6	30.5	19.0
Paja de trigo	32.9	24.0	8.9
Roble blanco	43.6	23.7	23.2
Roble rojo	43.4	23.5	25.8
Sorgo dulce	27.4	25	11
Tallo de algodón	58.5	14.4	21.5
Tallo de girasol	42.1	29.7	13.4
Tallo de maíz	35.0	16.8	7.0
Vaina de cebada	34.0	36.0	19.0

Fuente: Zhao *et al.*, 2012

#### 1.1.4. Principales cultivos generadores de residuos agrícolas

Como resultado de la actividad agrícola, se genera una gran cantidad de residuos. Parte de ellos pueden ser integrados en el suelo con la finalidad de mejorar las propiedades de este (hojas, raíces y frutos) y otros pueden ser aprovechados para algunas industrias o el sector ganadero (parte aérea de las plantas y tallos); también en esta actividad se generan residuos no aprovechables en su zona de generación y por tanto es necesario diversos métodos de eliminación para facilitar el manejo agrícola (Santos, 2008). Estos últimos se producen en los siguientes cultivos:

- a) **Cultivos de cereales.** A nivel mundial se genera anualmente altas cantidades de residuos agrícolas de origen vegetal, siendo procedentes del cultivo de cereales como el trigo, avena, maíz, cebada, centeno, así como el arroz y soja (Dale y Kim, 2004) los residuos agrícolas más importantes cuantitativamente. Los residuos generados por estos tipos de cultivos son de naturaleza fibrosa. Por lo general, la cantidad de residuos generados por hectárea de cultivo de cereales varía entre 1,4 y 4,3 toneladas, no obstante, estos datos pueden reducirse si es que estos residuos son de gran utilidad en su zona de generación (Leyva y Martínez, 2014).

Tabla 3. *Generación de residuos de cultivos de cereales*

<i>Cereal</i>	<i>Producción neta de residuos (g/m<sup>2</sup>)</i>	
	Diario	Anual
<i>Arroz</i>	1.36	497
<i>Avena</i>	0.98	359
<i>Trigo</i>	0.90	344

Fuente: Martínez y Leyva, 2014

- b) **Cultivos industriales.** Dentro de esta categoría se encuentran los cultivos de fibras textiles y semillas oleaginosas los cuales producen como residuos tallos con alto contenido lignocelulósico con alrededor de 42.2% de celulosa, 29.7% de hemicelulosa y 13.4% de lignina. Estos residuos no pueden ser aprovechados y son eliminados generalmente por medio de la quema. Los cultivos de girasol y algodón generan entre 1 a casi 10 toneladas de residuos orgánicos agrícolas (Santos, 2008).
- c) **Cultivos frutales, vitícolas y plataneras.** La poda anual es muy importante para este tipo de cultivos. Constituyen una fuente de material combustible de elevado poder calorífico. Las cantidades de residuos generados por hectárea de cultivo varían de 1,7 t en los cultivos de melocotón a 2 t/ha en cultivos de olivo; 5,33 toneladas en cultivos de manzano y cifras mayores en algunas zonas de cultivos de la vid (Santos, 2008).

**1.1.5. Aspectos ambientales y sanitarios derivados de la generación y producción de residuos agrícolas**

Existen diversos problemas derivados por el vertido incontrolado al ambiente y del inadecuado manejo de los residuos agrícolas, destacando el impacto visual, la contaminación ambiental, generación de focos infecciosos y de vectores que pueden causar daños a los cultivos aledaños. También es posible generar daños colaterales por la incineración incontrolada de estos residuos.

**a) Aspectos ambientales**

La emisión de contaminantes al aire mediante la quema de residuos agrícolas constituye una fuente importante de emisiones tóxicas, dado que esta práctica resulta ser la manera más fácil de deshacerse de los residuos agrícolas generados, permitiendo al agricultor despejar las zonas de cultivos, eliminar una serie de plagas, evitar el uso de maquinaria y sobre todo reducir el volumen de sus residuos, resultando a largo plazo el empobrecimiento de la tierra de cultivo (Comisión para la Cooperación Ambiental [CCA], 2014). Se considera que la quema de residuos agrícolas genera el 32% de CO, 40% de CO<sub>2</sub> y 50% de hidrocarburos aromáticos policíclicos emitidos a nivel mundial (Levine y Kambis, 1996), así como, la liberación de dioxinas por la presencia de agroquímicos, los cuales fueron adsorbidos por las hojas y tallos de los residuos agrícolas (Ver figura 4).

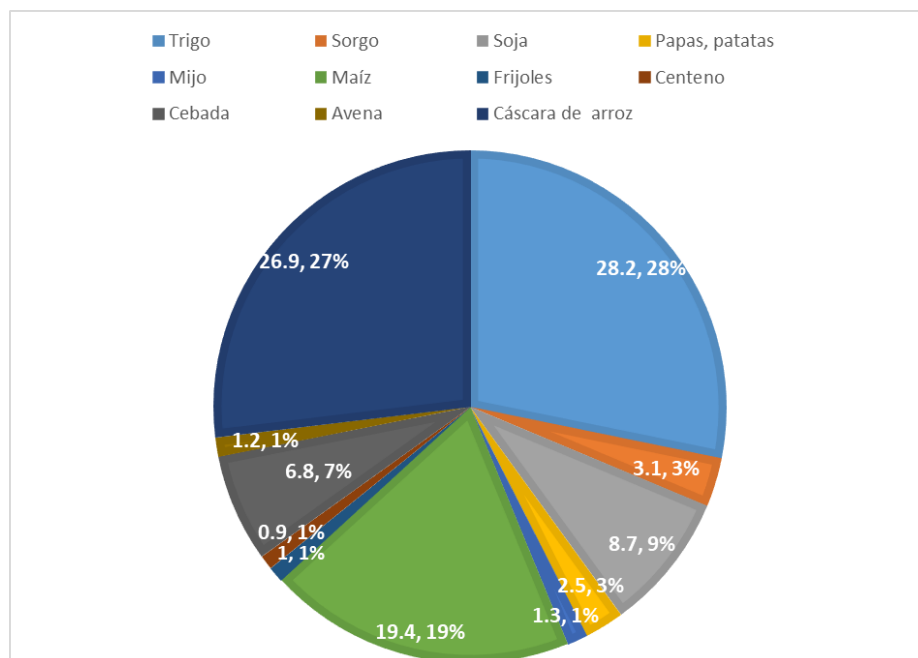


Figura 4. Emisiones expresadas como CO<sub>2</sub> equivalente por tipo de cultivo (promedio 1990-2011)

Fuente: FAOSTAT, 2014

### **b) Riesgo fitopatológico derivado de la acumulación de restos agrícolas**

La presencia de residuos agrícolas en mal estado, dada la incidencia de algunas plagas y enfermedades, puede generar que estos se conviertan o actúen como reservorios de microorganismos patógenos vegetales, información descrita en diversos manuales o artículos científicos, poniendo en manifiesto que los residuos agrícolas pueden diseminar una multitud de agentes fitopatógenos, mediante diferentes mecanismos de transmisión tales como el viento, agua, vectores, animales o por el propio ser humano (Jiménez, 2009).

Los cambios sufridos por nuestra sociedad en lo que se refiere a metodología y prácticas de manejo agrícola, sobre todo en las últimas décadas y en relación con los cultivos hortícolas intensivos, han influido notablemente sobre el desarrollo y la dispersión de las enfermedades de las plantas (Altieri, 1994; Pérez y Vázquez, 2004). Algunos de ellos son la alta densidad de plantas cultivadas por unidad de superficie, la modificación de las temporadas de cultivo, la ausencia de rotaciones de cultivos, el empleo de grandes cantidades de fertilizantes, el uso intensivo de plaguicidas, o la introducción de variedades nuevas de plantas, a veces extrañas a una región concreta, generando el agravamiento de las enfermedades o la mayor incidencia de ciertas plagas (Moreno, 2006).

### **c) Efectos en la salud de la acumulación de residuos orgánicos agrícolas**

Haciendo un enfoque en la salud pública, la acumulación de residuos resulta preocupante dado que conlleva a una elevada exposición directa de la población a los contaminantes contribuyendo al cambio climático, puesto que son fuentes no puntuales de contaminantes atmosféricos, resultando difícil su medición y regulación. Por otro lado, la emisión de contaminantes tales como los hidrocarburos aromáticos policíclicos y material particulado, pueden causar enfermedades mortales como el cáncer y enfermedades respiratorias como el asma, entre otros. Un ejemplo de este caso, sucede en el Sur de Luisiana (Estados Unidos) que durante la época de quema de la caña de azúcar, se ha registrado un aumento del 50% de problemas respiratorios como el asma (Asrabadi *et al.*, 2002). Caso similar ha sido reportado en Brasil, país en el cual se ha evidenciado el incremento de las enfermedades respiratorias y el aumento de las concentraciones de material particulado en la atmósfera.

## **1.2. Gestión y manejo de los residuos orgánicos agrícolas**

### ***1.2.1. Gestión y manejo de los residuos orgánicos agrícolas a nivel internacional***

Son muchos los esfuerzos enfocados hacia el desarrollo de nuevas tecnologías que permitan el uso de residuos orgánicos agrícolas como fuente renovable para la producción de biocombustibles y alimentos, en función a la definición de sus características mediante el análisis inmediato (Motta *et al.*, 2012).

En las islas de Creta y Hoogwijk se realizaron la estimación del potencial energético de residuos orgánicos agrícolas y de residuos derivados de los animales (Hoogwijk *et al.*, 2003). Asimismo, en países asiáticos como Tailandia, India, Filipinas y China se han realizado investigaciones sobre el potencial energético de los residuos urbanos y agrícolas, con la finalidad de mejorar la matriz energética de cada país, realizar estimaciones respecto a la disponibilidad energética y contribuir con la mitigación del cambio climático (Bhattacharya *et al.*, 2005).

En Europa con la finalidad de encontrar los espacios adecuados para la instalación de plantas de biomasa, se han generado una cartografía respecto al potencial energético de los residuos forestales de la Región de Navarra, España (Domínguez *et al.*, 2003). Por otro lado, en Estados Unidos se ha realizado un atlas de los recursos renovables energéticos, tomando como aspectos importantes los residuos de cosecha y de cultivos de cereales, los residuos forestales, rellenos sanitarios y los desechos de animales. En países de Latinoamérica, Brasil es el país más preocupado en la determinación del potencial energético de los residuos agrícolas, por ejemplo, para el estado de Paraná, con la finalidad de cubrir la demanda de energía de la región se están investigando nuevas fuentes alternativas de energía.

Además, se ha estudiado la posibilidad de producir hongos medicinales y de consumo mediante el aprovechamiento de los residuos agrícolas, siendo la especie que más destaca el *Pleurotus ostreatus* debido a su calidad nutricional y la facilidad de su cultivo (López *et al.*, 2006). Este hongo se desarrolla de la manera más óptima sobre residuos ricos en fibra y de material leñoso como bagazos, ramas y troncos. También constituye una opción para la obtención de proteínas de importancia industrial. Para el cultivo de este hongo se puede reutilizar residuos agroindustriales que presenten una composición similar a su ambiente natural, dado que estos por lo general terminan siendo arrojados a los basureros o ríos sin tratamiento previo o son quemados.

### ***1.2.2. Gestión y manejo de los residuos orgánicos agrícolas a nivel nacional***

En el Perú mediante el DS N° 016-2012-AG, se aprobó el reglamento de manejo de residuos sólidos del sector agrícola, cuyo objetivo primordial consiste en la regulación del manejo y gestión de los residuos orgánicos derivados de las actividades agrícolas, bajo los principios de minimización y prevención de problemas ambientales, protegiendo el bienestar y la salud de las personas y promoviendo el desarrollo sostenible del Perú.

En el artículo 27°. Gestión de los residuos de las actividades agrícolas establece que los residuos de biomasa vegetal de los diversos tipos de cultivos tales como frutícolas, hortícolas, cereales, etc., los cuales pueden ser usados como mejoradores de la textura y nivel de fertilidad del suelo, reduciendo los problemas por erosión hídrica o por el viento. Por otro lado, el compostaje representa una alternativa de valorización material o energética de los residuos de la agricultura, en el cual los desechos de biomasa vegetal se usan como aportadores de carbono orgánico,

también puede usarse como fuente de biocombustibles. Según este decreto, está totalmente prohibido realizar la quema de residuos agrícolas. Sin embargo, a pesar de la existencia de este tipo de decretos en nuestro país la quema de los residuos derivados de la agricultura en las zonas urbanas y rurales urbanas aún sigue siendo un problema latente.

La Dirección general de Asuntos Ambientales Agrarios (DGAAA) exige que los agricultores y/o las empresas pequeñas, medianas y grandes presenten cada año su Plan de manejo de residuos sólidos, el cual es un manual donde se anota en detalle todo el tratamiento del manejo agrícola y los procesos orgánicos en las parcelas, sin importar el tamaño. Los agricultores también deben presentar una declaración de residuos donde deben detallar exactamente como manejan los residuos agrícolas.

### **1.3. Producción de energía limpia a partir de la degradación de los residuos orgánicos**

Usualmente este tipo de energía se relaciona con los llamados biocombustibles, los cuales se obtienen a partir de la biomasa de origen vegetal o animal, y podrían ser una buena opción para reemplazar a los combustibles fósiles. La palabra biomasa, hace referencia a la materia orgánica derivada de residuos metabólicos, así como de plantas.

#### **Obtención de biogás**

El biogás se forma a partir de descomposición anaeróbica, proceso mediante el cual no hay presencia de oxígeno. Su relevancia se basa en la producción de diversos gases, compuesto mayoritariamente por metano (50-75%) y CO<sub>2</sub> (25-50%). También, cantidades trazas de siloxanos y cantidades reducidas de algunos compuestos que contienen azufre (Abraham *et al.*, 2007).

En un estudio sobre la biodegradación para residuos orgánicos de plaza de mercado (Cardona *et al.*, 2004) se analizaron posibles tratamientos con la finalidad de obtener productos de valor agregado, para lo cual se vio conveniente realizar la conversión de celulosa y almidón de los residuos, mediante glucoamilasa y celulasas comerciales. La conversión de la celulosa fue de 4% a 60 °C a pH 4 y el almidón alcanzó el valor de 60 % a 50 °C a pH 6. En la producción de biogás se determinó que por cada kilogramo de residuos tratados producen, en el rango de temperatura mesofílica, aproximadamente 4 L de biogás. En un estudio posterior, se evaluó la capacidad de obtención de biogás mediante tratamiento biológico (Cobián, 2009) aeróbico, anaeróbico de los residuos agrícolas (restos triturados de poda, restos de colza, y girasol). Este sistema demostró tener la capacidad de funcionar a una escala similar a la industrial en lo que respecta la producción de biogás.

Asís *et al.*, (2006), evaluaron la capacidad de obtención de energía a partir de biogás obtenido de residuos. Para la producción de biogás los residuos previamente clasificados pasaron por 4 procesos: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. En este estudio se llegó a la

conclusión que mediante la combustión de la fracción orgánica de los residuos es posible generar una potencia eléctrica de 457.5 kW, no obstante, esta no llegaría a ser suficiente para abastecer una ciudad.

### Obtención de biodiesel y bioetanol

#### a) Tecnología de conversión

El bioetanol y biodiesel son los biocombustibles líquidos más conocidos (Tabla 4). El bioetanol se puede obtener en base a cualquier tipo de biomasa vegetal que contenga cantidades relevantes de azúcares o almidón. Hoy en día existe gran predominio en la generación de bioetanol a partir de materiales amiláceos tales como los cereales y granos, alrededor de un 53%. En este sentido, el desarrollo de esta tecnología comienza desde la selección, la limpieza y la molienda de los granos. El proceso de molienda debe estar condicionada con un porcentaje de humedad cuando los granos se encuentren fraccionados o mediante vía seca. En estos dos casos, el almidón es hidrolizado para obtener azúcares mediante procesos a elevadas temperaturas. Los azúcares que han sido liberados pasan por un proceso de fermentación mediante el uso de levaduras, el producto resultante es purificado para la obtención del bioetanol y otros coproductos.

Tabla 4. *Panorama general de los biocombustibles*

<i>Biocombustible</i>	<i>Materia prima</i>	<i>Costo de producción</i>	<i>Producción de biocombustibles por hectárea</i>	<i>Tierras utilizadas</i>
<i>Bioetanol</i>	Granos (trigo, maíz)	Moderado	Moderado	Tierras fértiles
<i>Bioetanol</i>	Caña de azúcar (soya, canola)	Bajo	Alto	Tierras fértiles
<i>Biodiesel</i>	Aceite de semillas	Moderado	Bajo	Tierras fértiles
<i>Biodiesel</i>	Aceite de palma	Moderado a bajo	Moderado	Tierras costeras y húmedas

Fuente: IEA,2005

Por otro lado, la generación de biodiesel a partir de mecanismos bioquímicos usando el azúcar como sustrato, es otra alternativa sugerida. Asimismo, se han reportado estudios en el cual revelan la alta capacidad de ciertos microorganismos heterótrofos como las levaduras oleaginosas, que se diversifican en fuentes carbonadas, para ser empleados para la producción del biodiesel, aunque según reportan no son tan eficientes en comparación al uso de las microalgas (Ratledge, 1982). Las levaduras productoras de aceites forman parte de un grupo muy grande con capacidad de acumular hasta un 20% de lípidos como biomasa. Se ha determinado que, para que haya buen almacenamiento de los lípidos en las levaduras, es importante una rigurosa selección de las cepas y la formulación de medios de cultivo con bajo contenido de fósforo y nitrógeno, esta última con

contenido entre el 50- 70 % por debajo del contenido ideal. Teniendo en consideración estos aspectos se puede producir entre un 50 a 70% de lípidos (Ratledge, 1993).

La Universidad de Munster en Alemania (Kalscheuer *et al.*, 2006), usó una cepa de la *Escherichia coli* genéticamente modificada. Según reportan, dos genes derivan de la bacteria *Zymomonas mobilis*, los cuales se encargan de la generación de alcohol. En tanto al tercer gen, esta procede del *Acinetobacter baylyi* el cual permite a la bacteria realizar una reacción química del aceite con el alcohol para la producción de biodiesel. Esta bacteria tiene la capacidad de desarrollarse en un medio de azúcares y aceite, sin ningún inconveniente para producir biodiesel de manera directa. Fue posible obtener concentraciones de ácidos grasos de 1.28 g/l y un contenido de ácidos grasos celular del 26% en la biomasa seca lo cual fue posible mediante fermentación alimentada por lotes, utilizando fuentes de carbono renovables. Este novedoso enfoque podría allanar el camino para la producción industrial de biodiesel equivalentes a partir de recursos renovables empleando microorganismos genéticamente modificados, permitiendo el uso de combustibles similares al biodiesel en el futuro.

#### **b) Hidrólisis de residuos lignocelulósicos**

Hoy en día, es muy imponente la idea de que la obtención de bioetanol por medio de la hidrólisis de residuos orgánicos agrícolas constituya una alternativa de energía renovable en el futuro. Sin embargo, hay muchos desafíos que aún faltan superar. Los mecanismos existentes para la producción de etanol en base a residuos orgánicos agrícolas comprenden la hidrólisis de los polisacáridos presentes en la biomasa a monómeros de azúcares y su posterior fermentación para la obtención del etanol. Para llevar a cabo este proceso, es necesario emplear tecnologías multifásicas y de alta complejidad, en función a vías enzimáticas o ácidas para el rompimiento de los enlaces de lignina y su posterior remoción.

Alvear *et al.*, (2009), evaluaron la hidrólisis ácida en cáscaras de naranja (*Citrus sinensis*) trituradas provenientes de la industria de vinos para la obtención de etanol. Se usó cáscaras de naranja deslignificadas previamente con ácido sulfúrico a tres concentraciones diferentes: 3, 5 y 7 %, a 1 atm de presión, y 125 °C por alrededor de 15 minutos. Determinando que es posible la obtención de jarabes glucosados, no obstante, dado el bajo rendimiento registrado no es viable económicamente, siendo necesario realizar nuevos estudios para hacer más eficiente este proceso. Además, se registró que la obtención de etanol a partir de cáscaras de naranja no tuvo un alto rendimiento. En un estudio posterior, se evaluó la capacidad de obtención de etanol a partir de la producción de jarabes glucosídicos mediante hidrólisis enzimática y ácida usando como sustratos residuos de poda (Tejeda *et al.*, 2011). Para la hidrólisis enzimática se utilizaron enzimas celulasas, y para la hidrólisis ácida se empleó una solución de ácido sulfúrico. En el estudio se obtuvo que la hidrólisis ácida presenta mayor conversión, con una producción entre 10 y 30 g/l



de glucosa que, por el proceso de hidrólisis enzimática, pudiendo ser viable la obtención de biocombustibles a partir de este tipo de residuos.

En un estudio experimental sobre la producción de etanol usando residuos agrícolas derivadas de plantaciones de banano (Calderón y Aquije, 2014) mediante el uso de enzimas celulolíticas (Cellic Ctec 2) se logró obtener un destilado de 92% de pureza de etanol, siendo desde el punto de vista técnico viable para la producción de etanol a partir de residuos de plantas de banano, no obstante, es importante tomar en cuenta que cada proceso requiere de condiciones específicas con la finalidad de ampliar su aplicación a escala industrial. Posteriormente se evaluó el uso de *Zymomonas mobilis* CECTB-4286 para la obtención de bioetanol (Lizarraga, 2016), usando como sustrato jugo de caña de azúcar. En esta investigación se concluyó que la *Z. mobilis* inmovilizadas en pellets de agar presentan mayor generación de etanol. Del mismo modo se reportó respecto a la producción de etanol a partir de la fermentación del camote (Yucra y Brown, 2012).

### **CONCLUSIÓN**

En la actualidad, la técnica de mayor interés en cuanto al reaprovechamiento de residuos orgánicos agrícolas es la hidrólisis de residuos lignocelulósicos, dado que diversos estudios confirman la viabilidad de producir energía limpia mediante esta técnica, pudiendo ser usadas incluso a nivel industrial, no obstante, es necesario que se realicen más investigaciones relacionadas al uso de nuevos tipos de residuos orgánicos derivados de la agricultura, así como estudios microbiológicos con alto potencial para transformar diversos residuos orgánicos en energía renovable. Por último, el uso de residuos orgánicos agrícolas como materia prima para la obtención de biogás, biodiesel y bioetanol, constituyen una oportunidad para la generación de energía limpia a bajos costos, además de contribuir a la solución de la problemática ambiental generada por la quema y mala disposición de los residuos agrícolas.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abraham, E., Ramachandran, S., y Ramalingam, V. (2007). Biogás: Can it be an important source of energy? *Env. Sci. Pollut. Res*, 14(1), 67-71.
- Almeida, M., Guimarães, V., Leal, T., y Visser, E. (2015). Increased enzymatic hydrolysis of sugarcane bagasse from enzyme recycling. *Biotechnology for biofuels*, 8(1), 5.
- Altieri, M. (1994). Bases agroecológicas para una producción agrícola sustentable. *Agricultura técnica*, 54(4), 371-386.
- Altieri, M., y Nicholls, C. (2007). Conversión agroecológica de sistemas convencionales de producción: teoría, estrategias y evaluación. *Revista ecosistemas*, 16(1).
- Alvear, M., Castillo, C., Henao, D., Marimón, W., Tejada, C., Tejada, L., y Villabona, A. (2009). Estudio de la hidrólisis ácida de cáscaras de naranja citrus síntesis para la obtención de etanol. In *Memorias del IV Simposio de Química Aplicada-SIQUIA*, 1-8.
- Aro, N., Pakula, T., y Penttilä, M. (2005). Transcriptional regulation of plant cell wall degradation by filamentous fungi. *FEMS microbiology reviews*, 29(4), 719-739. <https://academic.oup.com/femsre/article-abstract/29/4/719/492673>
- Asís, H., Dopazo, F., y Gianoglio, P. (2006). *Producción de energía a partir de biogás obtenido de residuos sólidos urbanos*. Universidad Tecnológica Nacional.
- Asrabadi, B., Boopathy, R., y Ferguson, T. (2002). Sugar cane (*Saccharum officinarum* L) burning and asthma in Southeast Louisiana, USA. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, 68(2), 173-179.
- Bhattacharya, S., Salam, P., Runqing, H., Somashekar, H., Racelis, D., Rathnasiri, P., y Yingyuad, R. (2005). An assessment of the potential for non-plantation biomass resources in selected Asian countries for 2010. *Biomass and bioenergy*, 29(3), 153-166.
- Boerjan, W., Brunow, G., Kim, H., Lu, F., Lundquist, K., Ralph, J., y Schatz, P. (2004). Lignins: Natural polymers from oxidative coupling of 4-hydroxyphenyl- propanoids. *Phytochemistry Reviews*, 3(1-2), 29-60.
- Calderón, J. E., y Aquije, H. F. (2014). *Estudio experimental de obtención de bioetanol a partir de residuos agrícolas de banano orgánico en Piura*. <https://pirhua.udep.edu.pe/handle/11042/1744>
- Capek, P., Ebringerova, A., Kacurakova, M., Sasinkova, V., y Wellner, N. (2000). FT-IR study of plant cell wall model compounds: pectic polysaccharides and hemicelluloses.

- Carbohydrate polymers*, 43(2), 195-203.
- Cardona, C., Sánchez, Ó., Ramírez, J., y Alzate, L. (2004). Biodegradación de residuos orgánicos de plazas de mercado. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 6(2), 78-89.
- Castells, X. (2012). *Tratamiento y valorización energética de residuos* (Ediciones).
- Castells, X., Furtes, J., y Martínez. (2012). *Impactos ambientales y energía: Tratamiento y valorización energética de residuos* (Ediciones).
- Cerda, D., Manterola, H., y Mira, J. (1999). *Los residuos agrícolas y su uso en la alimentación de rumiantes*. Fundación para la Innovación Agraria.
- Claramunt, R., Farrán, M., López, C., y Perez, M. (2013). *Química Bioorgánica y Productos Naturales*. Editorial UNED.
- Cobián, D. (2009). *Tratamiento biológico aerobio-anaerobio-aerobio de residuos ganaderos para la obtención de biogás y compost*. Universidad de León.
- Comisión para la Cooperación Ambiental [CCA]. (2014). *La quema de residuos agrícolas: fuente de dioxinas*. [www.cec.org](http://www.cec.org)
- Red Española de Compostaje. (2014). *Residuos agrícolas* (Ediciones).
- Cruz, S., y Ojeda, S. (2013). Gestión sostenible de los residuos sólidos urbanos. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 29(3), 7-8.
- Dale, B., y Kim, S. (2004). Global potential bioethanol production from wasted crops and crop residues. *Biomass and bioenergy*, 26(4), 361-375.
- Domínguez, J., Ciria, P., Esteban, L., Sánchez, D., y Lasry, P. (2003). Evaluación de la biomasa potencial como recurso energético en la región de Navarra (España). *Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, 3, 1-10.
- FAOSTAT. (2014). Food and Agriculture Organization statistical database. Retrieved Feb.
- García, L. (2003). *La madera y su anatomía: anomalías y defectos, estructura microscópica de coníferas y frondosas, identificación de maderas, descripción de especies y pared celular*.
- Görgens, J., Rose, S., Trollope, K., y Van, W. (2010). Fungal  $\beta$ -mannanases: mannan hydrolysis, heterologous production and biotechnological applications. *Process Biochemistry*, 45(8), 1203-1213.
- Guarnizo, A., Martínez, P., y Valencia, H. (2009). Pretratamientos de la celulosa y biomasa para la sacarificación. *Scientia Et Technica*, 15(42), 284-289.

<https://www.redalyc.org/pdf/849/84916714053.pdf>

- Hoogwijk, M., Faaij, A., Van Den Broek, R., Berndes, G., Gielen, D., y Turkenburg, W. (2003). Exploration of the ranges of the global potential of biomass for energy. *Biomass and bioenergy*, 25(2), 119-133.
- Jiménez, M. (2009). *La agricultura ecológica: beneficios socioeconómicos y ambientales*. Universidad Politécnica de Valencia.
- Kalscheuer, R., Stölting, T., y Steinbüchel, A. (2006). Microdiesel: Escherichia coli diseñado para la producción de combustible. *Microbiology*, 152(9), 2529-2536.
- Keegstra, K., y Pauly, M. (2010). Plant cell wall polymers as precursors for biofuels. *Current opinion in plant biology*, 13(3), 304-311.
- Levine, J., y Kambis, A. (1996). Biomass burning and the production of carbon dioxide: a numerical study. *Biomass burning and global change*, 1, 170.
- Leyva, A., y Martínez, A. (2014). La biomasa de los cultivos en el oecosistema. Sus beneficios agroecológicos. *cultivos tropicales*, 35(1), 11-20.
- Liu, D., Zhang, L., y Zhao, X. (2012). Biomass recalcitrance. Part I: the chemical compositions and physical structures affecting the enzymatic hydrolysis of lignocellulose. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 6(4), 465-482.
- Lizarraga, E. (2012). *Evaluación de la movilización de Zymomonas mobilis CECTB-4286 en dos tipos de soporte para la producción de etanol, utilizando como sustrato caña de azúcar*. Universidad nacional de Trujillo.
- López, C., Zuluaga, A., Herrera, S., Ruíz, A., y Medina, V. (2006). Production of citric acid with *Aspergillus niger* NRRL 2270 from milk whey. *Dyna*, 73(150), 39-57.
- Ministerio de Agricultura Alimentación y Medio Ambiente [España]. (2013). Programa Estatal De Prevención De Residuos. *Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental y Medio Natural*, 32.
- Montoya, L., Sánchez, F., y Yepes, S. (2008). Valorización de residuos agroindustriales—frutas— en Medellín y el sur del valle del aburrá, Colombia. *Rev.Fac.Nal.Agr.Medellin*, 61(1), 4422-4431. <http://www.scielo.org.co/pdf/rfnam/v61n1/a18v61n1.pdf?>
- Moral, R., y Moreno, J. (2008). *Compostaje* (Ediciones). [https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=APuzwas6rrcC&oi=fnd&pg=PA4&dq=Joaquín+Moreno+Casco,+Raul+Moral+Herrero.+\(Eds.+Científica\).+Compostaje.+Capítulo+2+1.+Residuos+agrícolas.&ots=BRSxI0stR1&sig=GJjtJykjmWromBfgmnsbKiRJezc#v=one](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=APuzwas6rrcC&oi=fnd&pg=PA4&dq=Joaquín+Moreno+Casco,+Raul+Moral+Herrero.+(Eds.+Científica).+Compostaje.+Capítulo+2+1.+Residuos+agrícolas.&ots=BRSxI0stR1&sig=GJjtJykjmWromBfgmnsbKiRJezc#v=one)

page&q&f=false

- Moreno, L. (2006). La lucha contra las plagas agrícolas en Cuba. De las aplicaciones de plaguicidas químicos por calendario al manejo agroecológico de plagas. *Fitosanidad*, 10(3), 221-242.
- Motta, D., Aguilar, J., y Aguirre, E. (2012). Una revisión a la reglamentación e incentivos de las energías renovables en Colombia. *Revista Facultad de Ciencias Económicas*, 20(2), 55-67.
- Pérez, N., y Vázquez, L. (2004). *Manejo ecológico de plagas* (CEDAR).
- Polizeli, M., Rizzatti, A., Monti, R., Terenzi, H., Jorge, J., y Amorin, D. (2005). Xylanases from fungi: properties and industrial applications. *Applied microbiology and biotechnology*, 67, 577-591.
- Ramos, D., y Terry, E. (2014). Generalidades de los abonos orgánicos: importancia del bocashi como alternativa nutricional para suelos y plantas. *Revista Cultivos tropicales*, 35, 52-59.
- Ratledge, C. (1982). Microbial oils and fats: an assessment of their commercial potential [Algae, yeasts, fungi]. *Progress in industrial microbiology*.
- Ratledge, C. (1993). Aceites unicelulares, ¿tienen un futuro biotecnológico? *Tendencias en biotecnología*, 11(7), 278-284.
- Santos, C. (2008). *Residuos agrícolas, forestales y lodos* (EIO).
- Tejeda, L., Quintana, J., Pérez, J., y Young, H. (2011). Obtención de etanol a partir de residuos de poda, mediante hidrólisis ácida e hidrólisis enzimática. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 14(1), 111-116.
- Van Soest, P. (1982). *Nutritional ecology of the ruminant*.
- Yucra, S., y Brown, A. (2012). *Producción de etanol a partir de la fermentación del camote*. Universidad Nacional de Ingeniería.
- Zumalacárregui, L., Pérez, O., Rodríguez, P., Zumalacárregui, B., y Lombardi, G. (2015). Potencialidades del bagazo para la obtención de etanol frente a la generación de electricidad. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 16(3), 407-418.