

# **Utilización de residuos orgánicos agroindustriales para la producción de sustratos agrícolas y energías renovables**

Dra. Ileri Victoria Robles González  
Ingeniería en Agronomía  
(951) 50 1 72 08 Ext. 1024  
ileri.robles@jacinto.novauniversitas.edu.mx

## **Resumen**

El Estado de Oaxaca produce el 65% del mezcal del país, por lo tanto también genera un volumen considerable de bagazo (más de un millón de toneladas de bagazo en peso seco), al cual no se le da un tratamiento adecuado para evitar contaminación ambiental en aguas, suelos y atmósfera.

Entre las alternativas que presentan mejores posibilidades de utilización del bagazo proveniente de la industria mezcalera, se encuentran los procesos de biotransformación a partir del proceso de composteo (generación de abono orgánico que puede ser utilizado como fertilizante o sustrato) o la utilización de la digestión anaerobia (producción de biogás como energía alternativa frente al consumo de combustibles fósiles).

El presente proyecto intenta dar una alternativa biotecnológica para el aprovechamiento de residuos agroindustriales, en particular al bagazo generado por la industria mezcalera del estado de Oaxaca.

**Palabras clave:** bagazo, composteo, digestión anaerobia, mezcal, residuos agroindustriales

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 Importancia del mezcal en el estado de Oaxaca

El mezcal (del náhuatl mexcalli, "pencas de maguey cocidas", de metl "maguey" e ixcalli "cocido") es una bebida alcohólica originaria del estado de Oaxaca, elaborada a partir de la destilación del zumo fermentado de varias especies de agave. Existen diferentes tipos de agave, y cada uno produce una versión diferente de mezcal.

El mezcal es una bebida regional obtenida por destilación y rectificación de mostos preparados directa y originalmente con los azúcares extraídos de las cabezas maduras de los agaves (*Agave angustifolia* Haw, *Agave esperima jacobi*, *Agavee weberi cela*, *Agave patatorum zucc*, *Agave salmiana Otto Ex Salm SSP Crassispina (trel) Gentry* y otras especies de agave, siempre y cuando no sean utilizadas como materia prima para otras bebidas de origen dentro del mismo estado) previamente hidrolizadas o cocidas, y sometidas a fermentación alcohólica con levaduras, cultivadas o no, siendo susceptible de ser enriquecido (NOM-070-SCFI-1994).

En el estado de Oaxaca sobresale la zona denominada "La Región del Mezcal" que incluye los distritos de Sola de Vega, Miahuatlán, Yautepec, Tlacolula (Santiago Matatlán), Ocotlán, Ejutla y Zimatlán. En este estado se han identificado 23 especies y variedades de agaves cultivados y silvestres que son empleados en la fabricación de mezcal; de las 5 más importantes, destaca el maguey "Espadín" (*Agave angustifolia* Haw) al acumular casi el 60% del inventario magueyero de la Región del Mezcal (Tabla 1). La tendencia al empleo generalizado del maguey "Espadín" en el establecimiento de plantaciones, se explica por su precocidad, mayor rendimiento y por la preferencia que goza entre los productores de mezcal por su blandura y calidad del producto obtenido. Esta tendencia a la uniformidad en las plantaciones aumenta el riesgo de incidencia de plagas y enfermedades, y significa un desaprovechamiento productivo y comercial de otros magueyes mezcaleros.

**Tabla 1. Distribución del inventario magueyero por distrito, según especies y variedades (Sistema Producto Maguey-Mezcal, 2004)**

Distrito	Tipo de Agave						Total
	<i>Espadín</i>	<i>Mexicano</i>	<i>Barrilito</i>	<i>Cirial</i>	<i>Penca Verde</i>	<i>Otros</i>	
Tlacolula	98.6	0.6	0.6	0	0	0	100
Ejutla	30.1	33.3	0	13.6	0	23.0	100
Yautepec	88.0	0	0	0	0	12.0	100
Miahuatlan	61.6	6.3	0	29.7	0	2.4	100
Zimatlán	8.9	0	0	0	71.6	19.5	100
Ocotlán	93.1	0	0	3.9	0	3.0	100
Sola de Vega	38.6	16.0	15.6	0	0	29.8	100

De acuerdo al Censo del Sector Mezcalero 1999, elaborado por el Instituto de Capacitación y Productividad para el trabajo del Estado de Oaxaca (ICAPET) se registraba para ese año, una superficie total sembrada de maguey mezcalero *Angustifolia* Haw (Espadín), de 11 ml 756.21 hectáreas, siendo los distritos de Tlacolula, Yautepec y Etlá, los que concentraban el 80.5%, mientras que los cuatros distritos restantes se distribuían el 19.5% (Tabla 2).

**Tabla 2. Superficie sembrada de maguey mezcalero *Angustifolia Haw* en el Estado de Oaxaca, 1999 (I Censo del Mezcal del Estado de Oaxaca, ICAPET 1999).**

Región	Distrito	Hectáreas	Porcentaje
Valles Centrales	Tlacolula	4,392.10	37.4
Sierra Sur	Yautepec	3,284.19	27.9
Valles Centrales	Ejutla	1,788.29	15.2
Sierra Sur	Miahuatlán	1,023.10	8.7
Valles Centrales	Ocotlán	775.85	6.6
Sierra Sur	Sola de Vega	363.44	3.1
Valles Centrales	Zimatlán	129.25	1.1
<b>Total</b>		<b>11,756.21</b>	<b>100</b>

Actualmente se puede agrupar a los productores en las cuatro grandes categorías: pequeños, medianos, semi-industriales e industriales, cada una con diferente acceso a recursos económicos, políticos, sociales y culturales. En las zonas rurales de Ocotlán y Tlacolula hay pequeños y medianos productores de agave y de mezcal, que producen para el autoconsumo y para la venta a granel a pequeña escala. Algunos de ellos surten a los productores industriales de materia prima y de mezcal, que los últimos envasan y comercializan con su marca. Este sector, que es el más numeroso, recibe sin embargo una muy pequeña parte de los ingresos económicos que genera la cadena maguey-mezcal. Particularmente los productores de maguey se encuentran sujetos a los vaivenes que provocan los ciclos de escasez y sobreoferta de agave cuyos precios fluctúan entre US\$0.06-\$1.1 por kilo. En cuanto al mezcal, la venta a granel se paga generalmente a menos de US\$2. Los mezcaleros de este sector producen entre 1000 y 10000 litros por año. Este tipo de productores suele llevar a cabo negociaciones y transacciones comerciales por su cuenta, con un menor acceso a redes y a información. El mayor número de productores de agave y mezcal se ubican en el Tlacolula, pero la mayor diversidad de agaves y de mezcales se encuentra en Ocotlán (Pool-Illsley & Illsley-Granich, 2010).

La producción de mezcal es la tercera fuente de exportaciones del estado de Oaxaca, sólo por debajo de la cerveza y el café, el 24.89% de la producción del estado se destina al mercado externo; representa los ingresos de más de 50 mil familias en la entidad. Pero además, el mezcal, es sinónimo de identidad y tradición de los oaxaqueños, aunado también a que la presencia del mezcal en los mercados regional, nacional e internacional, hacen que su producción juegue un papel importante en la economía del estado. Una capacidad instalada para envasar 8.8 millones de litros, 625 fábricas, 80 plantas envasadoras y la generación de 30 mil empleos directos y alrededor de 100 mil indirectos, también revelan la importancia de la industria del mezcal.

Durante el 2009, se tuvo un volumen de producción de 975 mil litros de mezcal certificado, de los cuales se exportaron alrededor de 300 mil litros, principalmente a los Estados Unidos, seguido de Australia y la Unión Europea, lo que representó ingresos para la industria del orden de los dos millones de dólares (Secretaría de Economía, 2010). Hasta diciembre de 2008, en la entidad existían 68 millones 885 mil 921 plantas de agave certificado DO MEZCAL, 8 mil 163 productores, 9 mil 268 predios, 131 mil 379.77 hectáreas, 26 millones 905 mil 310 plantas productoras, 4 mil 720 hectáreas de superficie promedio cosechada, 302 mil toneladas de producción de maguey mezcalero y a un precio de 118 dólares por tonelada de agave (SAGARPA, COMERCAM).

## **1.2 Proceso de producción del mezcal**

Su producción se efectúa de tres formas: la artesanal, con trabajo predominantemente familiar, dirigido al autoconsumo y muy poco al mercado local regional. La segunda, produce también de manera artesanal pero utilizando en forma creciente trabajo asalariado con producto destinado al mercado. Una tercera forma es la producción industrial, la cual se encuentra en sus inicios.

En el proceso de producción del mezcal están involucradas las siguientes etapas: I. Recolección; II. Cocción; III. Molienda; IV. Fermentación; V. Destilación; VI. Refinado y VII. Envasado.

### **I. Recolección**

Para la recolección de la materia prima (agave) son necesarias ciertas condiciones o características, tales como las siguientes: coloración verde-amarillenta en la base de las pencas y parda en la base del maguey, así como la presencia de pencas secas en esta zona. Desde el punto de vista bioquímico, el estado de madurez apropiado lo marca un alto contenido de azúcares que puedan ser aprovechados por los microorganismos para la generación de alcohol.

La recolección del maguey sigue tres operaciones principales:

#### **a) Corte de las pencas**

Tiene la finalidad de eliminar aquellos órganos de la planta que no son útiles para su procesamiento, tales como las hojas o pencas.

#### **b) Extracción de la piña**

Es la operación de recolección propiamente dicha, para esto se ocupan barretas y la extracción se efectúa desde la base y no desde la raíz, esto con el propósito de no recolectar partes que puedan dar sabores desagradables al mezcal.

#### **c) Rasurado**

Esta operación tiene la función de completar la eliminación de las pencas de tal forma que sólo quede el corazón.

### **II. Cocción**

La cocción se lleva a cabo para hidrolizar o transformar los fructanos en fructosa, monosacárido apropiado para que se lleve a cabo la fermentación. Esta operación se lleva a cabo en un horno construido a partir de un agujero cavado en la tierra.

### **III. Molienda**

La trituración tiene como finalidad hacer que los monosacáridos obtenidos en la cocción sean más disponibles a la acción microbiana, así como a la captación de microorganismos del medio para favorecer la fermentación. En esta etapa se obtienen los jugos del bagazo, lo cual genera residuos sólidos (bagazo del agave) el cual es llevado generalmente a un lugar en donde es colocado sin tratamiento alguno, generando mal olor y concentración de agentes patógenos, es decir, contaminación ambiental.

### **IV. Fermentación**

En la fermentación los azúcares contenidos en las piñas se transforman en etanol por medio de la fermentación alcohólica, ruta metabólica propia de las levaduras. Esta operación se lleva a cabo en tinas de madera durante un tiempo aproximado de ocho a diez días, tomando en consideración la temperatura ambiente.

### **V. Destilación**

En esta operación se efectúa la separación del alcohol del agua aprovechando para ello sus diferentes puntos de ebullición. El etanol, debido a la estructura molecular, tiene un punto de

ebullición más bajo que el agua (78.5 °C a nivel del mar), por lo tanto, se separa de ésta al alcanzar esta temperatura. El dispositivo utilizado para la destilación es el alambique. Este equipo está conformado por cuatro elementos fabricados en cobre debido a su alta conductividad térmica, de tal forma que facilita la transferencia de calor, calentándose y enfriándose fácilmente, alcanzando así la temperatura apropiada de separación. Una vez realizada la destilación se separa el bagazo usando un biello, posteriormente se transporta y se coloca en montones afuera del palenque, y es considerado como desecho.

#### **VI. Refinación**

Al mezcal obtenido en la operación anterior se le llama mezcal de primera destilación. Como se mencionó anteriormente, los últimos garrafones de la primera destilación tienen una graduación de alcohol baja para los requerimientos del envasado (43°GL), de ahí que necesiten refinarse para elevar su contenido de alcohol. El equipo a utilizar y los pasos a seguir son similares a los de la destilación.

#### **VII. Envasado**

Finalmente se realiza la operación de envasado. Esta se realiza en diferentes envases dependiendo de lo que se vaya a envasar: mezcal minero (blanco), añejo, reposado, gusano, pechuga, cremas, etc. Las presentaciones existentes son: 50 mL, 250 mL, 500 mL y 750 mL, en envases de vidrio o en ollas de barro (Ramales-Osorio & Ortiz-Bravo, 2006).

### **1.3 Generación de residuos orgánicos por parte de la industria mezcalera**

Para obtener un litro de mezcal son necesarios de seis a doce kilos de agave. En el 2009, este sector produjo cerca de 975 mil litros de mezcal certificado (Secretaría de Economía, 2009), lo que generó más de un millón de toneladas de bagazo en peso seco. El bagazo es el residuo de los azúcares extraídos para producir el mezcal, es decir, azúcar, celulosa, lignina y hemicelulosa, los cuales provocan un serio problema de contaminación, a consecuencia de los grandes volúmenes acumulados y su resistencia a la degradación, que se lleva entre dos y tres años. Esto genera malos olores y fermentación, además es un nicho para la multiplicación de roedores y patógenos, incluso un riesgo, porque es material flamable. También deteriora el paisaje, ya que esos desperdicios van a parar a tiraderos, cárcavas u hondonadas (Rodríguez-Macías *et al.*, 2010).

### **1.4 Problemática de los residuos agroindustriales en México**

Los subproductos agroindustriales constituyen un problema serio de residuos en gran parte del mundo debido a dos factores principales: un aumento en la producción y al surgimiento de leyes ambientales más estrictas. Los principales impactos negativos de la agroindustria se relacionan con la contaminación de suelos y acuíferos, así como la emisión de gases que contribuyen al efecto invernadero. Esto se debe a la eliminación de residuos sólidos, líquidos y semilíquidos, con alta concentración de carga orgánica y bacterias, lo cual requiere un saneamiento adecuado para minimizar su impacto ambiental. Los principales residuos agroindustriales provienen de: el sector pecuario (avicultura, ganado bovino y ovino), industria alimentaria (lácteos, carnes, frutas y verduras), industria de las bebidas (jugos, vinos, cervezas, etc.) e industria azucarera. Los desechos agroindustriales son de naturaleza orgánica y prácticamente están clasificados en origen, lo cual facilita su reciclaje. También constituyen una fuente de materia prima barata y accesible. Además, cualquier residuo agroindustrial puede ser convertido en diversos productos con mayor valor agregado, incluyendo sustitutos de derivados petroquímicos y combustibles.

## 1.5 Utilización de residuos agroindustriales

Una vía para transformar estos residuos agroindustriales de origen orgánico es la utilización de los siguientes procesos biológicos:

- a) *COMPOSTEO*: es un proceso en el cual se realiza la degradación de la fracción orgánica de los residuos sólidos por la acción de diversas poblaciones biológicas bajo condiciones controladas, hasta un estado lo suficientemente estable que permite su almacenamiento y utilización sin efectos nocivos. Al producir composta se puede contribuir con la aportación de materia orgánica y nutrientes a los campos de cultivo; contribuyendo a mantener la fertilidad del suelo y asimismo reducir el impacto económico y de contaminación ambiental que genera el uso de fertilizantes y plaguicidas en el ambiente (Semple *et al.*, 2001; Ramdane & Mohan, 2004).
- b) *DIGESTIÓN ANAEROBIA*: donde participan microorganismos anaerobios que permiten lograr que la energía contenida en los residuos agroindustriales pueda ser transformada, liberada y reciclada en biocombustible de alta calidad (biogás). El biogás es un combustible formado básicamente por metano y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Su elevado contenido en metano (entre el 60-65%) le proporciona una elevada capacidad calorífica lo que hace posible, tras ser depurado para eliminar vapor de agua y H<sub>2</sub>S, su uso en calderas (si la producción es pequeña) y/o en motores de co-generación (cuando la producción es más elevada). El uso de biogás en motores de co-generación permite obtener electricidad y calor. Por su parte, el calor generado en el motor puede ser empleado para diferentes usos (calefacción, agua caliente, secado, invernaderos, producción de frío, etc). El sustrato una vez digerido se puede usar como enmienda en cultivos, ya sea directa o tras ser sometido a un proceso de separación sólido/líquido y posteriormente estabilizado de la fracción sólida mediante el proceso de compostaje. En algunos casos para aumentar la producción de biogás es factible añadir otros residuos biodegradables a los residuos industriales. La principal ventaja de la co-digestión radica en el aprovechamiento de la sinergia de las mezclas, compensando las carencias de cada uno de los residuos orgánicos por separado, además de incrementar el potencial de producción de biogás y dar una estabilidad adicional al sistema (PSE PROBIOGAS, 2009).

## **2. JUSTIFICACIÓN**

Los subproductos agroindustriales constituyen un problema serio de residuos en gran parte del mundo debido a dos factores principales: un aumento en la producción y al surgimiento de leyes ambientales más estrictas. Dichos subproductos agroindustriales generan de forma ineludible residuos causantes de contaminación ambiental en aguas, suelos y atmósfera, que además ponen en peligro la salud humana y el nicho ecológico de muchas especies animales y vegetales. De la gran diversidad de residuos agroindustriales generados en México, la de la industria del mezcal resulta un problema ambiental grave. El Estado de Oaxaca produce el 65% del mezcal del país, por lo tanto también genera un volumen considerable de bagazo (más de un millón de toneladas de bagazo en peso seco) el cual no se le da un tratamiento adecuado, para no ocasionar problemas ambientales, ni tampoco los productores de mezcal pueden darle un valor agregado. Entre las alternativas que presentan mejores posibilidades de utilización del bagazo proveniente de la industria mezcalera, se encuentran los procesos de biotransformación a partir del proceso de compostaje (generación de abono orgánico que puede ser utilizado como fertilizante, además de poder mejorar las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo) o la utilización de la digestión anaerobia (producción de biogás como energía alternativa al consumo de combustibles fósiles).

El presente proyecto intenta dar una alternativa biotecnológica para el aprovechamiento de residuos agroindustriales, en particular al bagazo generado por la industria mezcalera del estado de Oaxaca.

## **3. OBJETIVOS**

### **3.1 Objetivo General**

- Utilizar el bagazo generado en el proceso de elaboración del mezcal para producción de sustrato orgánico y biogás.

### **3.2 Objetivos Específicos**

- Realizar la caracterización fisicoquímica del bagazo del mezcal
- Determinar la proporción bagazo/residuo orgánico en el sistema de composteo y en el digestor anaerobio
- Montar y estabilizar el sistema de composteo, así como el digestor anaerobio
- Realizar el monitoreo fisicoquímico y microbiológico de ambos sistemas biológicos

## **4. METODOLOGÍA**

### **4.1 Plan de trabajo**

La estrategia general de trabajo se muestra en la Figura 1 y se dividió en las siguientes tres etapas con sus respectivas actividades:

#### **ETAPA 1. CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DEL BAGAZO DEL MEZCAL**

*Actividad 1.* Determinación de las propiedades físicas del bagazo: densidad aparente, densidad real, porosidad del sustrato, retención de humedad, porosidad del aire, agua fácilmente disponible y agua total disponibles.

*Actividad 2.* Determinación de las propiedades químicas del bagazo: capacidad de intercambio catiónico, pH, conductividad eléctrica, carbono orgánico total, nitrógeno orgánico total, concentración de ácidos fenólicos, determinación de P, Na, K, Mg, Ca, Zn y Fe.

#### **ETAPA 2. MONTAJE DEL SISTEMA DE COMPOSTEO**

*Actividad 3.* Diseño y construcción de las pilas de composteo experimentales.

*Actividad 4.* Determinación de las mezclas de bagazo/residuo orgánico fácilmente degradable a utilizar en el proceso de composteo.

*Actividad 5.* Acondicionamiento del bagazo y del residuo orgánico a utilizar en las pilas de composteo

*Actividad 6.* Montaje arranque y operación de las pilas de composteo.

*Actividad 7.* Seguimiento y análisis de los parámetros determinados en las pilas de composteo.

*Actividad 8.* Caracterización fisicoquímica de la composta obtenida.

*Actividad 9.* Evaluación de la composta como sustrato orgánico y/o soporte para el cultivo en vivero de legumbres y de árboles de interés agroforestal.

#### **ETAPA 3. IMPLEMENTACIÓN DE LOS DIGESTORES ANAEROBIOS PARA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS**

*Actividad 10.* Diseño y construcción del digestor anaerobio.

*Actividad 11.* Determinación de las mezclas de bagazo/residuo orgánico fácilmente degradable a utilizar en el proceso de digestión anaerobia.

*Actividad 12.* Acondicionamiento del bagazo y del residuo orgánico a utilizar en el digestor anaerobio.

*Actividad 13.* Montaje arranque y operación del digestor anaerobio.

*Actividad 14.* Seguimiento y análisis de los parámetros determinados en el digestor anaerobio.



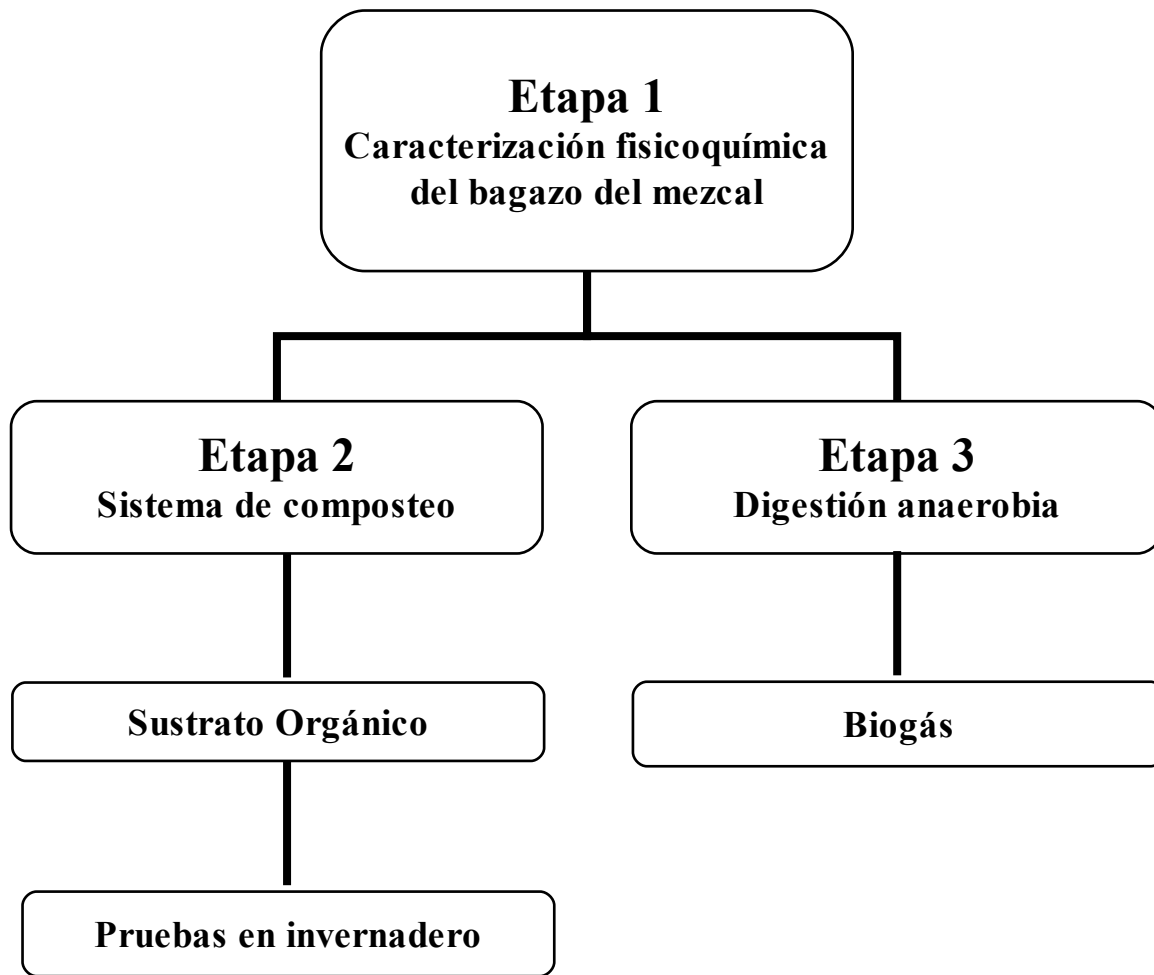


Figura 1. Estrategia de trabajo.

## 5. REFERENCIAS

COMERCAM, Consejo Mexicano Regulador del Mezcal Informe Anual 2010-2011.  
<http://www.comercam.org/>

Ignacio C F, Flores GJ, López -Toledo J. Memorias V Congreso Internacional de Ciencias Ambientales y XI Congreso Nacional de Ciencias Ambientales. 7- 9 de Junio, 2006. Oaxtepec, Morelos, México.

I Censo del Mezcal del Estado de Oaxaca, ICAPET 1999.

NOM-070-SCFI-1994. Norma Oficial Mexicana. Bebida Alcohólicas. Mezcal.  
<http://www.colpos.mx/bancodenormas/noficiales/NOM-070-SCFI-1994.PDF>

Ramales Osorio MC, Ortiz Bravo EG. (2007) El proceso de elaboración del Mezcal. Bebidas Mexicanas. Diciembre 2006 / Enero 2007, ALFA EDITORES TÉCNICOS. 28-32.

PSE PROBIOGAS Manual del estado del arte de la co-digestión anaerobia de residuos ganaderos y agroindustriales. Febrero 2009.  
[http://www.canseixanta.cat/zi.arxiu/apergas.cat/textweb/00000070/PROBIOGAS\\_Manual%20de%20Estado%20del%20Arte.pdf](http://www.canseixanta.cat/zi.arxiu/apergas.cat/textweb/00000070/PROBIOGAS_Manual%20de%20Estado%20del%20Arte.pdf)

Pool-Illsley E, Illsley Granich C. (2010) La Dinámica Territorial de la Zona Mezcalera de Tlacolula-Ocotlán en Valles Centrales de Oaxaca: entre la Cultura y el Comercio Desarrollo Territorial Rural con Identidad Cultural RIMISP-GEA. Septiembre.

Ramdane D & Mohan S. (2004) Production Practices and Quality Assessment of Food Crops, Volume 1: Preharvest Practice., Editorial Kluwer Law International, Norwell, MA,USA.

Rodríguez-Macías R., Alcantar-González EG., Iniguez-Covarrubias G., Zamora-Natera F., García-López PM., Ruíz-López MA., Salcedo-Pérez E (2010) Caracterización física y química de sustratos agrícolas a partir de bagazo de agave tequilero. *Interciencia* 35(7):515-520.

SCFI, Secretaria de Comercio y Fomento Industrial (1994) Norma oficial de bebidas alcohólicas, mezcal, especificaciones. NOM-070-SCFI-1994-BEBIDAS ALCOHOLICAS-MEZCAL-ESPECIFICACIONES. México, *Diario Oficial de la Federación*.

SE, Secretaría de Economía. 2010. Empresarios de Estados Unidos realizan una misión comercial en México, en busca de proveedores de Mezcal. Oaxaca, Oaxaca. Boletín de prensa .19 de julio 2010 B.72/10.

Semple KT, Reid BJ, Fermor TR (2001) Impact of composting strategies on the treatment of soils contaminated with organic pollutants. *Environ. Pollution*, 112: 269 - 283.