



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ

---

**FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS**

**PROGRAMA DE POSGRADO EN BIOPROCESOS**

**VALORIZACIÓN DE PRODUCTOS DE LA  
CONVERSIÓN TERMOQUÍMICA DE  
BIOMASA LIGNOCELULÓSICA RESIDUAL:  
BIOCHAR COMO ADITIVO AGRÍCOLA**

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
**MAESTRO EN CIENCIAS EN BIOPROCESOS**

PRESENTA:

**L.Q. LUISIANA FABIOLA PALOMO GONZÁLEZ**

DIRECTOR DE TESIS

**DR. MARCO ANTONIO SANCHEZ CASTILLO**

---

SAN LUIS POTOSÍ, S. L. P,

20 DE JULIO 2020



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS

PROGRAMA DE POSGRADO EN BIOPROCESOS

VALORIZACIÓN DE PRODUCTOS DE LA  
CONVERSIÓN TERMOQUÍMICA DE BIOMASA  
LIGNOCELULÓSICA RESIDUAL:  
BIOCHAR COMO ADITIVO AGRÍCOLA

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN CIENCIAS EN BIOPROCESOS

PRESENTA:

L.Q. LUISIANA FABIOLA PALOMO GONZÁLEZ

DIRECTOR DE TESIS

DR. MARCO ANTONIO SANCHEZ CASTILLO

**SINODALES:**

**PRESIDENTE:**

Dr. MARCO A. SÁNCHEZ CASTILLO \_\_\_\_\_

**SECRETARIO:**

Dr. JOSÉ ANTONIO AVALOS LOZANO \_\_\_\_\_

**VOCAL:**

Dr. PABLO DELGADO SÁNCHEZ \_\_\_\_\_

**VOCAL:**

Dr. SERGIO A. GÓMEZ TORRES \_\_\_\_\_

SAN LUIS POTOSÍ, S. L. P,

20 DE JULIO 2020

**Proyecto realizado en:**

Laboratorio de Bio y nanocatálisis

Facultad de Ciencias Químicas

Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

El programa de Maestría en Ciencias en Bioprocesos de la  
Universidad Autónoma de San Luis Potosí  
tiene el Reconocimiento del Programa Nacional de Posgrados de  
Calidad (PNPC) del CONACyT, con número de registro 000588, en  
el nivel Consolidado.

La estudiante agradece la beca de manutención otorgada por el  
CONACYT, con número de referencia 624305



Valorización De Productos De La Conversión Termoquímica De Biomasa Lignocelulósica Residual: Biochar Como Aditivo Agrícola por Marco Antonio Sánchez / L. Fabiola Palomo se distribuye bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

## **Agradecimientos Académicos**

### **Dr. Marco Antonio Sánchez Castillo**

Director de tesis, quien en todo momento ha mostrado su interés y compromiso por la formación integral de sus estudiantes, despertando en nosotros el deseo de superación personal y profesional. Gracias por la paciencia, la confianza y por la oportunidad de formar parte de su grupo de trabajo.

Le expreso mi profunda admiración y respeto.

### **Al comité evaluador**

Dr. José Antonio Avalos Lozano

Dr. Pablo Delgado Sánchez

Dr. Sergio Antonio Gómez Torres

Por el seguimiento que hicieron para la conclusión exitosa de este trabajo. Por la guía, aportaciones y comentarios siempre objetivos.

Les expreso mi profunda admiración y respeto. Gracias.

### **Al grupo de trabajo dirigido por el Dr. Marco Sánchez**

Dra. Martha Hernández Orta.

Ing. Claudia Arellano del Río.

Especialmente a Claudia, gracias por tú apoyo y enseñanzas. Me siento muy agradecida por haber tenido la oportunidad de conocerte y trabajar contigo, te admiro profundamente.

### **A mis maestros**

**Dr. Marco Martín González Chávez**

**M.C. Juana Alvarado Rodríguez**

Gracias por su apoyo y enseñanzas.

## **Agradecimientos Personales**

### **A mi familia**

La motivación de cada uno de mis pasos.

### **Ma. Dolores Gonzáles y José Luis Palomo**

Mis padres, quienes me han dado más que la vida.  
Ejemplos de esfuerzo, compromiso, responsabilidad y entrega.

### **Elizabeth y Aracely**

Mis hermanas, mi apoyo, mis cómplices.

### **Vanessa y Diego**

Mis ángeles

### **A mis amigos**

Agradezco a todas las personas que estuvieron involucradas directa e indirectamente en la realización de este proyecto de mi vida.

Gracias por estar cerca para soportarme y reconfortarme.

### **A los grandes amores de mi vida...**

# INDICE

ÍNDICE DE FIGURAS.....	7
ÍNDICE DE TABLAS.....	8
RESUMEN .....	9
ABSTRACT .....	11
<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>13</b>
<b>2. ESTADO DEL ARTE.....</b>	<b>17</b>
2.1. DEFINICIÓN DE BIOMASA.....	17
2.2. TIPOS DE BIOMASA.....	17
2.2.1. <i>Por composición química</i> .....	17
2.2.2. <i>Por su origen</i> .....	19
2.3. USOS DE LA BIOMASA .....	21
2.4. DILEMA DE USO DE BIOMASA PARA CONSUMO Ó PARA USO INDUSTRIAL.....	24
2.5. TIPOS DE BIOMASA PARA USO INDUSTRIAL O COMERCIAL .....	24
2.6. DISPONIBILIDAD DE BIOMASA EN MÉXICO PARA FINES INDUSTRIALES.....	26
2.7. AGROINDUSTRIAS LOCALES CON ALTA DISPONIBILIDAD DE BIOMASA RESIDUAL. ....	28
2.7.1. <i>Mezcalera artesanal</i> .....	28
2.8. SOLUCIÓN SUSTENTABLE: BIORREFINERÍA .....	33
2.9. UN ENFOQUE LOCAL: INTEGRACIÓN SECUENCIAL DE ETAPAS SUSTENTABLES .....	36
2.10. POTENCIAL DE APLICACIÓN DE LOS PRODUCTOS SOLIDOS DE LA VALORIZACIÓN DE LA BIOMASA RESIDUAL. ....	37
2.11. PIRÓLISIS DE BLR .....	38
2.12. APLICACIONES TÍPICAS DEL BIOCHAR .....	43
2.13. APLICACIONES AGRONÓMICAS .....	44
<b>3. ÁREA DE OPORTUNIDAD .....</b>	<b>48</b>
<b>4. JUSTIFICACIÓN .....</b>	<b>52</b>
<b>5. HIPÓTESIS.....</b>	<b>54</b>
<b>6. OBJETIVO.....</b>	<b>55</b>
6.1. OBJETIVO GENERAL .....	55
6.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	55
<b>7. METODOLOGÍA.....</b>	<b>56</b>
<b>8. RESULTADOS .....</b>	<b>57</b>
<b>9. CONCLUSIONES .....</b>	<b>58</b>
<b>10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>59</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1. Disposición de biomasa en México con fines energéticos.....	27
Figura 2-4. Productos de la valorización de residuos agroindustriales sólidos.....	38
Figura 3-1. Diagrama de producción de jitomate .....	50
Figura 4-1. Ciclo sustentable optimizado para el uso industrial de biomasa lignocelulósica ..	53

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1. Clasificación de la biomasa según su composición química y su uso como comestible.....	23
Tabla 2-2. Tipos de biomasa usada para la producción de biodiesel .....	25
Tabla 2-3. Tipos de tratamiento térmico de biomasa.....	35
Tabla 2-4. Reactores usados para la pirólisis de biomasa.....	42
Tabla 2-5. Aplicaciones del biochar.....	43
Tabla 2-6. Aplicaciones agronómicas de biochar.....	46

## RESUMEN

La biomasa lignocelulósica residual (BLR) es un recurso renovable que en la actualidad tiene múltiples aplicaciones. A partir de diversos procesamientos térmicos, químicos y/o biológicos, la BLR se puede transformar en: a) energía calorífica, b) energía eléctrica, c) biogás, d) bioetanol, e) biodiesel, f) bioturbosina, g) productos químicos con diferentes niveles de oxigenación. En particular, la pirólisis de la BLR genera tres productos: i) gas de síntesis, ii) bioaceite y iii) biochar. El biochar es un material orgánico con alto contenido de carbono y que está tipificado como un material multifuncional con diversas aplicaciones, entre las que se encuentra su uso como aditivo orgánico del suelo.

En esta tesis se sintetizó, caracterizó y evaluó funcionalmente el biochar obtenido a partir de un residuo de la industria mezcalera local, para evaluar su potencial como aditivo alternativo para la producción en invernadero de plántulas de jitomate (*Solanum lycopersicum*). El biochar se obtuvo de la pirólisis de bagazo de *Agave salmiana* en atmósfera de He, a  $P_{atm}$  y a 350 C, con una velocidad de calentamiento de 10 C/min. El biochar se caracterizó por métodos físicos para evaluar densidad y tamaño de partícula, y por métodos químicos para determinar composición química, contenido de metales y pH superficial. Se realizaron pruebas funcionales para validar el potencial del biochar como sustrato en la producción de plántulas de *Solanum lycopersicum*, comparándolo con un sustrato comercial (Peat Moss) y con mezclas con diferentes proporciones de biochar y Peat Moss.

El biochar presentó una densidad de 0.8 g/cm<sup>3</sup> y un tamaño de partícula entre 0.6 y 0.8 mm. Su composición química fue: celulosa 23.9%, hemicelulosa 17.5% y lignina 53.6 %. El contenido metálico indicó la presencia de calcio, magnesio, sodio y potasio como elementos preferentes. El pH superficial fue 7.8. Por otra parte, las pruebas funcionales mostraron que en el desarrollo de hojas, altura y grosor del tallo no hubo diferencia estadística entre las plántulas del control Peat Moss con las plántulas crecidas en las mezclas que contenían 25 y 50% de biochar. Estos resultados indicaron que el uso de hasta 50% de biochar en la mezcla con Peat Moss tuvo efectos

positivos en el desarrollo de las plántulas. De forma importante, la reducción de uso de Peat-Moss en la producción de plántulas de jitomate en invernaderos, usando una mezcla que incluye una proporción significativa de biochar, tiene un impacto favorable en la economía del proceso. A la fecha, el uso de solo biochar mostró un desfase de 15 días en el crecimiento de las plántulas, esto permitirá proponer un uso alternativo del biochar, que consiste en reservar las plántulas hasta que las condiciones climáticas sean las óptimas para el trasplante, este proceso se conoce como latencia.

Los resultados de esta tesis establecen las bases para optimizar la síntesis y, en consecuencia, las propiedades fisicoquímicas del biochar, para que en un futuro reemplace totalmente al Peat Moss como aditivo agrícola en el caso ejemplificado. Además, se estableció un marco de referencia para guiar el desarrollo comercial de biochar tomando en cuenta los parámetros que determinan la sustentabilidad del mismo. Este enfoque es relevante para contribuir a valorizar residuos de cadenas agroindustriales locales, contribuyendo así al proceso de economía circular desde una perspectiva sustentable.

Palabras clave:

Biomasa residual, Biochar, Tomate, Agricultura protegida, Economía circular.

## ABSTRACT

Residual lignocellulosic biomass (RLB) is a renewable resource that has multiple applications. RLB may be transformed by using thermal, chemical and/or biological processes to produce a) power, b) heat, c) biogas, d) bioethanol, e) biodiesel, f) jet biofuel, g) chemical products with different levels of oxygenation. In particular, thermochemical treatments such as pyrolysis generate three products: i) synthesis gas, ii) bio-oil and iii) biochar. Biochar is an organic material with high carbon content and it is typified as a multifunctional material with a number of applications, including its use as an organic soil additive.

In this thesis, biochar was synthesized, characterized and functionally evaluated, to determine its potential to be used as additive in the production of tomato (*Solanum lycopersicum*) plants in a greenhouse. Biochar was synthesized from the pyrolysis of *Agave salmiana* bagasse under a He atmosphere, at  $P_{atm}$  and 350 C, with a heating rate of 10 C/min. Biochar was characterized by physical methods to determine particle size and density, and also by chemical methods to evaluate its chemical composition, metal content, and surface pH. In addition, functional tests were carried out to validate the potential of biochar as a substrate in the production of *Solanum lycopersicum* plants, and to compare biochar's performance with that of a commercial substrate (Peat Moss) and also with that of biochar-Peat Moss mixtures with increasing biochar content.

Biochar's density was 0.8 g/cc and its particle size was in the range of 0.6 - 0.8 mm. Cellulose (23.9%), hemicellulose (17.5%) and lignin (53.6%) were found as the major biochar's components. Analysis of metallic content showed that Ca, Mg, Na and K were the main elements. Biochar's surface pH was 7.8. On the other hand, functional tests showed that there was no statistical difference in leaf development, height and stem thickness for the tomato plants grown in Peat Moss and for those plants grown in the biochar-Peat Moss mixtures containing 25 and 50% biochar. These results suggested that the use of up to 50% biochar in the mixture with Peat Moss had positive effects on tomato's plants development. It is noteworthy that the replacement of Peat

Moss by biochar in the production of tomato plants in a greenhouse has a favourable economic impact. It should also be noted that when only biochar was used as substrate, a 15-day lag in tomato's plants growth was observed; in some cases, this could be useful when preserving plants until the climatic conditions are optimal for transplantation (process known as latency).

Results of this thesis established the basis to optimize biochar synthesis and, consequently, its physicochemical properties. It could be expected that biochar with appropriate characteristics may completely replace Peat Moss as agricultural additive for growing tomato plants in a greenhouse. In addition, this thesis established guidelines for biochar commercial development taking into account sustainability issues. This approach is relevant for the valorisation of residual biomass from local agro industries, thus contributing to circular economy from a sustainable perspective.

**Key words:**

Residual Biomass, Biochar, Tomato, Protected agriculture, Circular Economy

## 1. INTRODUCCIÓN

La biomasa lignocelulósica residual (BLR) es una materia prima adecuada para la producción simultánea de energía limpia, combustibles verdes y una amplia gama de productos químicos para diversas industrias, constituyéndose en una de las mejores alternativas para reemplazar las materias primas fósiles que se usan actualmente. Entre los tipos de BLR que más se han empleado en este tipo de procesos se distinguen: a) residuos forestales, como astillas y aserrín; b) residuos agroindustriales, como el bagazo residual de la industria de caña de azúcar y el bagazo de las industrias del tequila y del mezcal (Kwapinsk *et al.*, 2010, Fanchini *et al.*, 2010, Liu *et al.*, 2012). De acuerdo a la SENER (2012), los cultivos agrícolas que generan la mayor cantidad de residuos incluyen: maíz, sorgo, caña de azúcar, frijol, cebada, algodón hueso, tomate, chile y cebolla. De hecho, en conjunto, estos representan más del 81% de los residuos generados en el país a partir de cultivos agrícolas. Por esta razón es muy importante considerar las podas verdes o las semillas y cáscaras resultantes de la producción de harinas como una importante fuente de materia prima, Además, otras agroindustrias bien establecidas en México generan grandes cantidades de residuos, entre ellos las levaduras en la producción de cerveza, los diversos residuos de café, la generación de estiércol y aguas residuales en la producción de carne y el orujo de la uva en la producción de vino, por mencionar algunos de los más relevantes.

La transformación eficiente de la BLR se puede optimizar en el contexto de una biorrefinería, en la cual se generan diversos productos de valor agregado y se aprovechan todas las fracciones o subproductos del proceso (Brown, 2009). A la fecha, ya se han documentado los beneficios de las biorrefinerías de BLR (Tian *et al.*, 2012):

- a) Económicos: proporcionan un valor agregado a la BLR debido al aprovechamiento de subproductos y contribuyen a mejorar la competitividad de diversos sectores industriales.
- b) Medioambientales: reducen las emisiones de gases de efecto invernadero y otros efectos negativos del uso de combustibles fósiles.

- c) Sociales: fortalece la economía del medio rural y contribuye a la mejora de los servicios e infraestructuras de estas zonas.

Si bien, el enfoque de una biorrefinería es muy pertinente y contribuye al desarrollo de procesos y productos sustentables, su adecuada implementación está por ahora acotada a la investigación y desarrollo tecnológico de las diversas etapas o procesos que la integran.

La conversión de la BLR se puede llevar a cabo mediante procesos: a) termoquímicos, b) químicos, c) bioquímicos (Lee *et al.*, 2017). Este proyecto está asociado a la valorización de productos y subproductos derivados de la conversión termoquímica de la BLR, la cual se puede llevar a cabo a través de: a) combustión, b) gasificación, c) pirólisis rápida y lenta. En general, los principales productos de estos procesos termoquímicos incluyen: a) gas de síntesis, b) bioaceite y c) biochar, en proporciones que dependen de las condiciones de los procesos termoquímicos. En la pirólisis lenta, que es de interés para esta tesis, la biomasa se somete a tratamiento térmico entre 350 y 500 C, a una velocidad de calentamiento de 10 C/min y en una atmósfera inerte. En estas condiciones, cuando la pirólisis se lleva a cabo en reactores de lote, la fracción producida mayoritariamente es la sólida, que se conoce como biochar. De esta forma, el biochar es un sólido orgánico formado por carbón en mayor proporción, por lo cual también se conoce como carbón vegetal.

Diversos estudios documentan que el biochar contribuye al desarrollo de procesos sustentables desde la perspectiva de una biorrefinería (Lehmann *et al.*, 2007, García *et al.*, 2014, Wang *et al.*, 2018, Weber *et al.* 2018). Como parte de este trabajo se revisó el caso de diversas agroindustrias locales y un área de oportunidad común fue la valorización BLR en biochar. Entre las opciones revisadas, se identificó que la valorización del bagazo residual de la industria mezcalera local tenía ventajas preferentes desde un punto de vista económico y social, y se propuso usarlo como materia prima para producir biochar. Es importante hacer notar que el biochar tiene numerosas aplicaciones. Una de las más comunes en el sector agrícola es como mejorador de suelos, ya que con un adecuado ajuste de sus propiedades físicas (micro y mesoporosidad) se mejoran sus características de retención de agua, de nutrientes

y de fijación de C atmosférico. De esta forma, el biochar contribuye a restaurar el equilibrio natural del suelo, a una mayor tolerancia a la sequía, y a un mayor rendimiento en la producción de cultivos.

Con base en lo anterior, en esta tesis se propuso el procesamiento del bagazo residual de una mezcalera local mediante la pirólisis lenta en un reactor de lote. Como parte de este proyecto, se documenta la construcción del pirolizador, así como su puesta en marcha y la solución de todos los problemas asociados al arranque de las operaciones. Así mismo, se documentan las condiciones que permite obtener mayoritariamente una fracción sólida orgánica. A este respecto, un detalle importante fue la selección de la temperatura de operación, ya que si bien está documentado que temperaturas iguales o mayores a 500 C favorecen la producción de biochar con una mayor porosidad y una distribución de poros acotada (Pastor-Villegas *et al.*, 2006); estas condiciones demandan más energía en el proceso de síntesis del biochar y hacen que el proceso sea menos sustentable. Por esta razón, se propuso inicialmente usar una menor temperatura de tratamiento térmico y, en el curso de la investigación, evaluar si este biochar resultante tenía el potencial agronómico esperado.

La caracterización del bagazo residual y del biochar sintetizado se realizó por diversas técnicas físicas y químicas. Las técnicas físicas evaluaron la humedad, la distribución del tamaño de partícula, la porosidad, la densidad real y aparente, así como la conductividad. Por otra parte, las técnicas químicas determinaron la composición química de la materia prima y del producto, el contenido de metales en cada muestra y la carga superficial preferente del biochar. Todas estas propiedades son relevantes para condicionar la aplicación del biochar como sustrato agrícola.

Posteriormente, la validación del potencial del carbón como sustrato agrícola se evaluó en pruebas de germinación plántulas en semillero. En este caso se usó el biochar puro, así como un sustrato comercial, Peat Moss, como material de referencia. Así mismo, se usó una serie de mezclas biochar-Peat Moss, para determinar el efecto de la composición de biochar en la mezcla sobre el crecimiento de las plántulas. Durante la etapa de crecimiento de las plántulas se evaluó periódicamente el crecimiento vegetativo y radicular de los siguientes parámetros morfofisiológicos:

altura de la plántula, diámetro del tallo, longitud de hojas verdaderas, longitud de raíz, peso fresco y seco, biomas y fluorescencia de clorofila.

El análisis de los resultados de este trabajo sugirió de qué forma las propiedades fisicoquímicas de biochar sintetizado, promueven o acotan su aplicación como sustrato agrícola. Así mismo, se identificó la proporción en la cual el biochar mezclado con Peat Moss tiene efectos favorables en el crecimiento de las plántulas de *Solanum lycopersicum*. Además, se encontró que el biochar solo tiene un efecto de retraso de 15 días en la germinación de la plántula. Esta característica deberá ser evaluada a futuro porque tiene implicaciones interesantes para otras aplicaciones agrícolas, como el proceso de latencia, que consisten en reservar las plántulas hasta que se tengan las condiciones climáticas óptimas para el trasplante. En conjunto, los resultados de la tesis establecen las bases técnicas para optimizar las características del biochar como aditivo agrícola en futuras etapas de la investigación.

Para contextualizar la relevancia de este trabajo, se hace notar que existen sustratos comerciales específicamente diseñados para la producción de hortalizas en invernaderos, como la turba, la perlita, la vermiculita y la lana de roca (Dumroese *et al.*, 2011, Tian *et al.*, 2012, Petter *et al.*, 2012, Northup *et al.*, 2013). Estos materiales tienen un impacto favorable en la productividad, ya que hacen uso del agua y de los fertilizantes de forma más eficiente que el suelo. Sin embargo, varios de estos sustratos son importados, por lo que tienen un sobre costo y en algunos casos hay un impacto ambiental en su producción. Por esta razón, una arista interesante desde el punto de vista técnico, ambiental y económico fue documentar preliminarmente el potencial del biochar como reemplazo de sustratos comerciales para el crecimiento de plántulas de jitomate, de particular interés de las regiones centro y altiplano del territorio potosino. Esta situación fue aún de mayor relevancia porque está asociada el hecho que el biochar es el producto de la valorización de BLR de una industria mezcalera localizada en una zona de elevada marginación económica y social de mismo estado. La progresiva y armónica integración de estos procesos puede ser un punto de partida favorable para establecimiento de las biorrefinerías de BLR y para contribuir a los procesos de economía circular.

## **2. ESTADO DEL ARTE**

### **2.1. Definición de Biomasa**

En este proyecto, por biomasa se refiere preferentemente a la materia de origen orgánico, generada por procesos naturales o por los procesos antropogénicos que la utilizan como materia prima. De forma general, cualquier tipo de biomasa proviene de la reacción de la fotosíntesis vegetal, que sintetiza las sustancias orgánicas a partir del CO<sub>2</sub> en presencia de luz solar, aunque incluye una amplia gama de variedades que se categorizan por su composición química, o por su origen natural o antropogénico. Desde un contexto energético, la biomasa se considera cualquier materia orgánica, derivada de un proceso biológico, espontáneo o provocado, que se pueda utilizar como fuente de energía (Vassilev *et al.*, 2010, SENER, 2012, <https://www.appa.es/appa-biomasa/que-es-la-biomasa/>).

### **2.2. Tipos de biomasa**

La biomasa se puede clasificar en distintas categorías. Se presentan a continuación las más útiles para el contexto de este trabajo.

#### **2.2.1. Por composición química**

Esta categoría distingue cuatro grupos principales de biomasa:

- a) Amilácea: polisacáridos como almidón o inulina
- b) Lignocelulósica: celulosa, hemicelulosa y polímeros orgánicos como la lignina.
- c) Azucarada: disacáridos y monosacáridos
- d) Oleaginosa: lípidos y ácidos carboxílicos.

##### **2.2.1.1. Amilácea**

La biomasa amilácea está compuesta principalmente por almidón (polisacárido) o inulina (polímero de fructuosa y glucosa). Ejemplos representativos de este tipo de biomasa son los cereales como maíz, trigo, avena, centeno, sorgo (que tiene preferentemente almidón) y los tubérculos como la papa, achicoria, raíz de Dalia, cebolla, ajo y yacón (que tienen preferentemente inulina).

El almidón es una mezcla de dos polisacáridos: la amilosa y la amilopectina, que están a su vez formados por unidades de glucosa. En general, los almidones contienen entre 20% y 30% de amilosa, aunque existen excepciones. Las propiedades tecnológicas del almidón dependen mucho del origen, y de la relación amilosa/amilopectina, tanto cuando forma parte de un material complejo (harina) como cuando se utiliza purificado, lo cual es muy frecuente. Por otra parte, la inulina es un polisacárido que se encuentra preferentemente en las raíces, tubérculos y rizomas de ciertas plantas fanerógamas y está compuesta de unidades de fructosa unidas por enlaces  $\beta$ -(2 $\rightarrow$ 1) fructosil-fructosa, por lo cual se conoce también como fructosano o fructano. Las inulinas se encuentran formadas usualmente por entre 60 y 100 unidades de fructosa y tienen la particularidad de terminar en una unidad de glucosa unida por un enlace  $\alpha$ -(1,2) (residuo -D-glucopiranosil) como en la sacarosa, pero también el monómero terminal de la cadena puede corresponder a un residuo de  $\beta$ -D-fructopiranosil.

#### **2.2.1.2. Lignocelulósica**

La biomasa lignocelulósica (BL) forma parte de la pared celular en los tejidos vegetales, por lo que está presente en la mayoría de las plantas. La pared celular permite crear y sostener la estructura de la planta, añadir resistencia a la degradación y a los agentes patógenos. Las células vegetales están constituidas por una red de fibras de celulosa que a su vez forman parte de las cubiertas de hemicelulosa y sobre las que se deposita la lignina. Los análisis químicos realizados en diversas especies de biomasa lignocelulósica indican la existencia de cuatro compuestos principales que integran la pared celular del tejido, por lo tanto, las características químicas de la biomasa están relacionados con su contenido de: celulosa, hemicelulosa, lignina y extraíbles (compuestos orgánicos solubles que tienen gran influencia en las propiedades físicas de la especie). En general, la BL tiene una gran heterogeneidad en su estructura anatómica y su composición química.

#### **2.2.1.3. Azucaradas**

Esta categoría incluye a la biomasa con un alto contenido de azúcares solubles, generalmente sacarosa. Ejemplos representativos de esta categoría son la caña de

azúcar y la remolacha. Por otra parte, como resultado del procesamiento termoquímico o biológico de los tipos de biomasa indicados en las secciones anteriores (lignocelulósica y amilácea) se pueden obtener azúcares, los cuales son los intermediarios importantes el proceso integral de conversión de biomasa en productos químicos de interés para diversas industrias. Inclusive, los azúcares se han propuesto como intermediarios relevantes para la posible producción de hidrocarburos a través del proceso de reformado en fase acuosa de estos compuestos oxigenados.

#### **2.2.1.4. Oleaginosas**

Este tipo de biomasa contiene aceites vegetales en sus semillas o frutos. Los ejemplos más representativos incluyen el girasol, la soya y la palma. Los aceites están constituidos principalmente de ácidos grasos, los cuales son ácidos monocarboxílicos de cadenas alifáticas que se pueden liberar de cualquier producto natural que los contenga mediante la hidrólisis. Los aceites contienen 10 tipos comunes de ácidos grasos que tienen entre 12 y 22 carbonos, más del 90% de los cuales tienen cadenas entre 16 y 18 carbonos. Algunas de estas cadenas son saturadas, monoinsaturadas, o poseen mayor número de insaturaciones.

### **2.2.2. Por su origen**

#### **2.2.2.1. Natural**

Es la biomasa que se produce de forma espontánea en la naturaleza, en ecosistemas que no han sufrido intervención humana. Ejemplos característicos son los bosques, selvas, matorrales, y vegetación hidrófila a la cual no se tienen restricciones de acceso por distancia a caminos, pendiente, por ser áreas naturales protegidas, o de alto valor de conservación (SENER, 2012). En 2015, la agencia Forest Resources Assessment de la FAO reportó que el área estimada de bosques a nivel mundial es de 3,952 millones de Ha, es decir, alrededor de 40 millones de km<sup>2</sup>, de las cuales 36% son bosques naturales y el resto son plantados.

#### **2.2.2.2. Cultivos extensivos**

Son aquellos que se obtiene de forma natural, sin usar ninguna técnica que maximice su producción. Un impacto favorable de estos cultivos es que son favorables

para la protección y/o la restauración del medio ambiente a nivel global. Ejemplos distintivos de este tipo de agricultura incluyen:

- a) Sembradíos de arroz en Asia.
- b) Agricultura de subsistencia: representativo de países en vías de desarrollo.
- c) Agricultura del secano: se da en regiones de escaso margen de precipitación pluvial o de hidrografía conveniente.
- d) La finca: este tipo de agricultura aprovecha los residuos de la cosecha y los residuos de la ganadería vacuna, porcina y/o aviar, para abonar el cultivo, creando un ecosistema en donde diversos procesos agrícolas y pecuarios se retroalimenten.
- e) Sembradíos ecológicos: en este tipo de agricultura se trata de prescindir de todo tipo de productos químicos contaminantes y de maquinaria en el cultivo, favoreciendo solo el uso de productos naturales; de esta forma se favorece la calidad del producto en lugar de cantidad.

#### **2.2.2.3. Cultivos intensivos**

Son aquellos que resultan de un método de producción agrícola que hace un uso intensivo de la tierra, porque se cultiva en dos ciclos al año, haciendo uso de semillas mejoradas, fertilizantes y pesticidas químicos, maquinaria y sistemas de riego, para maximizar la producción del producto. Este tipo de agricultura permite atender la creciente demanda de alimentos para consumo humano y animal y otras necesidades industriales y ornamentales de la sociedad. Como es de esperarse, este tipo de agricultura puede tener drásticas consecuencias para el ecosistema. Ejemplos de la agricultura intensiva incluyen:

- a) Monocultivos masivos.
- b) Agricultura de invernadero.
- c) Agricultura hidropónica.
- d) Cultivos florales comerciales.

#### **2.2.2.4. Cultivos energéticos**

Son cultivos de plantas de crecimiento rápido que se destinan a la generación de energía, o como materia prima para la obtención de combustibles. El objetivo en

este caso es maximizar la rentabilidad energética y económica del cultivo. El desarrollo de estos cultivos va acompañado de la correspondiente tecnología para transformar la biomasa en combustible. Entre los cultivos energéticos, se distinguen:

- a) Cultivos de semillas oleaginosas: ejemplos representativos son los cultivos de diferentes variedades de *Jatropha* (*Jatropha Curcas*, *Jatropha Platiphila*), Higuera, colza, soja y girasol.
- b) Cultivos productores de biomasa lignocelulósica: ejemplos distintivos incluyen especies leñosas cultivadas en turnos de rotación cortos, o los cultivos de especies herbáceas entre los que destaca el cardo.

#### **2.2.2.5. Biomasa residual**

Es la biomasa que se genera como resultado de diferentes actividades humanas y/o agroindustriales, entre las que se pueden citar:

- a) Residuos de actividades agrícolas, forestales y de jardinería.
- b) Residuos de industrias agrícolas y forestales.
- c) Residuos ganaderos.
- d) Residuos agroindustriales: alimentos, aceites, papel, etc.
- e) Residuos sólidos urbanos (RSU).
  - i) Residuos municipales: fracción orgánica de residuos sólidos urbanos (FORSU).
  - ii) Residuos industriales: otras fracciones como polímeros, metal, cerámicos, etc.

### **2.3. Usos de la biomasa**

La biomasa se ha utilizado prácticamente desde el origen de la humanidad. A lo largo del tiempo ha tenido diferentes usos y/o aplicaciones, entre los cuales se distinguen:

- a) Consumo humano: los cultivos de mayor demanda para este propósito se incluyen: maíz, sorgo, trigo caña de azúcar, frijol, cebada, algodón hueso, tomate, chile y cebolla.

- b) Consumo animal: los cultivos de mayor demanda en la actualidad para este propósito incluyen: pastos, cebadilla y alfalfa,
- c) Agroindustria: entre los de mayor relevancia se encuentran: producción de azúcar, harinas, tequila, mezcal, aceite de palma, cerveza, café y ron de caña
- d) Generación de energía calorífica.
- e) Generación de energía eléctrica.
- f) Cogeneración de energía eléctrica y calorífica.
- g) Producción de biocombustibles y de combustibles verdes: bioetanol, biodiesel, diésel verde, turbosina verde.
- h) Producción de químicos diversos para industria como la de alimentos, la de farmacia y la de polímeros, entre otras.

La Tabla 2-1 ejemplifica la clasificación de la biomasa de acuerdo a su composición química y también por su uso comestible ó no comestible. Se incluyen también ejemplos distintivos de cada uno de estos tipos de biomasa en el sector agrícola y forestal (Kwapinski *et al.*, 2010, Fanchini *et al.*, 2010, Liu *et al.*, 2012). Así mismo, se ejemplifican algunas de sus aplicaciones representativas y potenciales de cada uno de los tipos de biomasa.

Tabla 2-1. Clasificación de la biomasa según su composición química y su uso como comestible.

(Vassilev, 2010, Brevu *et al.*, 2010, Mittelbach, 2015, Favaroa *et al.*, 2017, Bridgeman *et al.*, 2018).

Biomasa	Composición química		Ejemplos		Productos característicos y potenciales
			Agrícolas	Agroindustria	
Oleaginosa	Lípidos	Triglicéridos	<b>Comestibles:</b> Semilla girasol, soja, canola, cáñamo, palma de aceite, ricino, canola, camelina, moringa grasas animales	<b>Producción de aceites usados</b>	<b>Biodiesel</b> A nivel piloto bioturbosina (queroseno renovable).
			<b>No comestibles:</b> Jatropha, higuera	<b>Grasas residuales</b> <b>Caso especial:</b> Microalgas	
Sacáridos	Monosacáridos	Glucosa, Fructosa	<b>Comestible:</b> Fruta, sorgo, remolacha azucarera	<b>Residuos de la elaboración de jugos y conservas:</b> Cáscaras, pulpas y semillas	<b>Bioetanol, Biogas</b>
	Disacáridos	Sacarosa			
Amilacea	Polisacáridos	Almidón	<b>Comestible:</b> Achicoria, granos de cereal, tubérculos, papa, maíz	<b>Residuos de la elaboración de harinas:</b> Tallos, cáscaras, mazorcas	<b>Bioetanol</b>
		Inulina	<b>No comestible:</b> Yuca		
Lignocelulósica	Polisacáridos	Hemicelulosa	<b>Comestible:</b> Caña de azúcar, nopal, cebada, frijol, lino, avena, colza, arroz, centeno, sésamo y trigo	<b>Residuos de la producción de azúcar, mezcal, etc:</b> Cáscaras de frutas, huesos, semillas, granos, tallos, bagazo, forraje, pulpas	<b>Bioetanol</b> <b>Energía calorífica</b> <b>Energía eléctrica</b> <b>Cogeneración</b>
		Celulosa	<b>No comestible:</b> Pastos, flores: alfalfa, bambú, algas marinas y de agua dulce, microalgas, sargazo		
		Lignina	<b>No comestibles:</b> <i>Maderas blandas:</i> pino, álamo, olmo, ciprés, abeto, cedro <i>Maderas duras:</i> caoba, roble, nogal, teca, cerezo, olmo, fresno.	<b>Residuos de la Industria forestal:</b> Tallos, ramas, follaje, cortezas, aserrín	

## **2.4. Dilema de uso de biomasa para consumo ó para uso industrial**

A principios del desarrollo de los procesos de conversión de biomasa, el empleo de biomasa comestible para la producción a gran escala de productos industriales (como los combustibles) originó el llamado “debate alimentos vs combustible”, así como preocupaciones sobre el adecuado uso del suelo. El uso de la biomasa comestible como el maíz o la caña de azúcar para producir etanol, o de aceites vegetales para producir biodiesel (biomasa de primera generación), planteó serios cuestionamientos, alertó a diversos sectores productivos y gubernamentales, y limitó en buena medida el desarrollo de la tecnología de conversión de biomasa. Sin embargo, estos problemas se resolvieron apropiadamente mediante el desarrollo de tecnologías basadas en la biomasa no comestible (por ejemplo, algunos cultivos extensivos no comestibles o biomasa lignocelulósica), y la biomasa residual (por ejemplo, los residuos forestales, residuos agrícolas, el aceite de cocina usado, residuos municipales), permitiendo de este modo la producción sustentable de una nueva generación de biocombustibles, los llamados biocombustibles de segunda generación. En este nuevo escenario, las materias primas utilizadas inicialmente para la producción de etanol pueden ser reemplazadas por fuentes de biomasa lignocelulósica. Del mismo modo, los aceites vegetales obtenidos a partir de materia prima comestible (tales como aceites de soya, de palma o de girasol), se pueden sustituir por cultivos intensivos no comestibles como la *Jatropha curcas*, y por residuos tales como el aceite de cocina usado y las grasas de origen animal.

## **2.5. Tipos de biomasa para uso industrial o comercial**

En general, el tipo de biomasa con fines de aplicación comercial, distintos a la industria de alimentos, ha sufrido una evolución. Actualmente, la biomasa usada como materia prima en la producción de biocombustibles y, en general, de bioproductos de alto valor agregado se categoriza como de primera, segunda, tercera o cuarta generación. En la Tabla 2-2 se ejemplifica cómo ha evolucionado el tipo de biomasa usado como materia para la producción de biodiesel.

De forma más general, los biocombustibles de primera generación se sintetizaban a partir de biomasa comestible producida en tierras de cultivo. Ejemplos representativos

de este tipo de biomasa fueron el uso de azúcar o de almidón para producir etanol mediante fermentación de levadura, o los aceites vegetales de canola o palma para producir biodiesel mediante transesterificación. Por otra parte, los biocombustibles de segunda generación se producen a partir de biomasa lignocelulósica, utilizando preferentemente residuos forestales, residuos agrícolas o residuos agroindustriales de cultivos comestibles, o bien de cultivos energéticos producidos de manera eficiente, que no agoten el suelo y que no consuman mucha agua o demanden fertilizantes químicos. Los biocombustibles de tercera generación se basan en el aprovechamiento de biomasa acuática (plantas). El ejemplo más representativo es el uso de algas que tienen un contenido de aceite natural mayor al 50% y que se puede cultivar en estanques usando aguas residuales tratadas. En este caso, el aceite extraído se puede usar para generar biodiesel o combustibles verdes líquidos y la pasta residual se puede procesar para generar etanol u otros productos químicos de alto valor agregado. La materia prima de cuarta generación incluye la biomasa generada como resultado de modificaciones genéticas, algunas de las cuales son inducidas mediante ingeniería metabólica o biología sintética. Las algas genéticamente modificadas son un ejemplo de biomasa que genera mayores rendimientos de aceite, en condiciones de crecimiento más drásticas. Otra vertiente novedosa es la producción de combustibles a partir de bacterias genéticamente modificadas, empleando CO<sub>2</sub> como materia prima.

Tabla 2-2. Tipos de biomasa usada para la producción de biodiesel  
(www.ibercib.es, 2009)

Generación	Materias Primas	Ejemplos para la síntesis de biodiesel
Primera	Provenientes de biomasa comestible	Aceites vegetales de maíz, canola, algodón, mostaza, palma, etc; grasas animales como el sebo o manteca de cerdo.
Segunda	Biomasa no comestible	Aceites vegetales de cultivos perennes, aceites de desecho de restaurantes como los usados para la fritura, grasa atrapada en las trampas de restaurantes y la grasa flotante en aguas tratadas; residuos municipales.
Tercera	Uso de microorganismos y/o microorganismos genéticamente modificados; biomasa transgénica	Microorganismos como algas, hongos, bacterias, levadura y mohos. Ejemplo: microalga <i>Chlorella protothecoidis</i>
Cuarta	Uso de microorganismos y plantas adaptados con alta captación de CO <sub>2</sub>	Mecanismo regulador de la fijación de dióxido de carbono en las plantas para ser almacenado como carbonatos

## **2.6. Disponibilidad de biomasa en México para fines industriales.**

Como se delineó en las secciones anteriores los residuos de varios cultivos agrícolas se pueden utilizar para producir energía, combustibles y productos químicos. De acuerdo a SENER (2016), en México, los cultivos agrícolas con la mayor producción de residuos son: maíz, sorgo, caña de azúcar, frijol, cebada, algodón hueso, tomate, chile y cebolla. En conjunto esto representa poco más de 81% de los residuos de cultivos generados en el país. Además de estos residuos, varias agroindustrias bien establecidas generan grandes cantidades de residuos, que se puede valorar en otros productos de interés comercial, entre las principales: caña de azúcar con la generación de bagazo, la producción de harinas que generan de semillas y cascara, la industria del tequila y del mezcal que generan bagazo, la producción de cerveza, el café con diversos residuos, la producción de ron de caña, la producción de carne que genera estiércol y aguas residuales y la producción de vino.

En la Figura 2-1 se describen las principales fuentes de biomasa disponible para su aprovechamiento energético en México, el cual se elaboró bajo el liderazgo del Laboratorio VARICLIM, de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí. En este trabajo solo se tomó en cuenta la biomasa que podría ser utilizada para fines energéticos, entre lo cual se considera: residuos agrícolas y forestales, residuos de cosecha, residuos agroindustriales, residuos sólidos urbanos y residuos pecuarios. La biomasa residual estimada fue aproximadamente 278 millones de toneladas de residuos sólidos. El potencial energético estimado para esta cantidad de residuos es aproximadamente 2,980 PJ. 56% del potencial proviene de los residuos agroindustriales y 36% de los agrícolas y forestales (Laboratorio VARICLIM; SENER 2016).

El uso de biomasa, al igual que otras fuentes alternas de energía (FAE), no altera el balance atmosférico de CO<sub>2</sub> (REMBIO, 2011) y las emisiones de CO<sub>2</sub> producidas durante su empleo, equivalen al carbono que previamente había absorbido la biomasa en el proceso de fotosíntesis. De esta forma, se igualan la retención y la liberación de CO<sub>2</sub> equivalente y no hay un incremento neto del CO<sub>2</sub> en la atmósfera (Liu *et al.*, 2011).

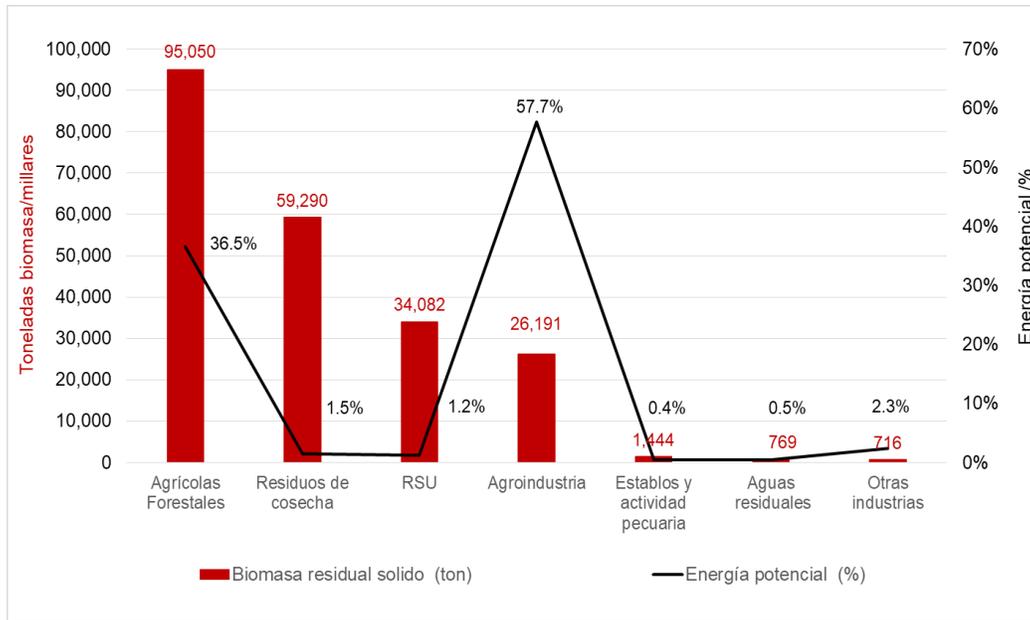


Figura 2-1. Disposición de biomasa en México con fines energéticos.

Si bien la biomasa es una más de las FAE, varios autores han documentado que la gama de productos que se pueden obtener de la biomasa a partir de su procesamiento físico, térmico, químico o biológico, la pueden hacer preferente debido a que (Cornelissen *et al.*, 2012, Creutzig *et al.*, 2015):

- a) Genera calor y electricidad, como en los casos de la hidráulica, la solar, la eólica y la geotérmica.
- b) Produce combustibles sólidos (pellets y briquetas), líquidos (bioetanol, biodiesel, bioturbosina) y gaseosos (biogás) que no se generan por las otras FAE.

Los biocombustibles sólidos se pueden quemar directamente o previa gasificación o pirólisis, para producir calor y electricidad. Incluyen: leña, residuos agrícolas, residuos forestales, carbón vegetal y, de forma más elaborada, pellets y briquetas de los materiales indicados. Los Biocombustibles líquidos se obtienen de la conversión de productos primarios como los cultivos energéticos, los residuos agrícolas y los forestales. Estos originan productos como bioetanol, biodiesel, bioturbosina y, más recientemente, combustibles verdes. Los Biocombustibles gaseosos se obtienen de la conversión bioquímica de residuos municipales y agrícolas y generan biogás para generar calor y/o electricidad. Es posible también producir productos químicos de alto valor agregado, con

propiedades similares a las que genera una refinería fósil. Esta singularidad de la biomasa para producir, de una misma fuente, toda la gama de productos que demanda el portafolio de energía de un país, la hacen de particular valía para el reemplazo de las fuentes fósiles de energía (Fengel *et al.*, 1989, Bustamante *et al.*, 2016).

## **2.7. Agroindustrias locales con alta disponibilidad de biomasa residual.**

En este trabajo, se identificaron algunas opciones locales en el sector agroindustrial para validar documentadamente las áreas de oportunidad en la valorización de residuos de biomasa. En total se caracterizaron 10 ecosistemas:

- a) Producción de mezcal.
- b) Ingenio azucarero.
- c) Producción de nopal.
- d) Producción de naranja.
- e) Invernaderos.
- f) Establo lechero.
- g) Rastro.
- h) Industria papelera.
- i) Industria lechera.
- j) Residuos orgánicos municipales.

A continuación, se describe el caso de la industria mezcalera artesanal por ser una de las más representativas del estado de San Luis Potosí.

### **2.7.1. Mezcalera artesanal**

De acuerdo al Consejo Regulador de Mezcal y la NOM-070-SCFI-2016, el mezcal es una bebida alcohólica regional obtenida por destilación y rectificación de mostos preparados directa y originalmente con los azúcares extraídos de las cabezas maduras del agave, previamente hidrolizadas o cocidas, y sometidas a fermentación alcohólica con levaduras. En relación a su comercialización un aspecto de particular relevancia es la denominación de origen, que corresponde a una región geográfica del país que sirve para designar un producto originario de la misma, y cuya calidad o características se

deben exclusivamente al medio geográfico (Secretaría de Economía, 2015). San Luis se ubica entre los estados de la República Mexicana que cuentan con denominación de origen para la producción de mezcal (Planeación Agrícola Nacional, 2017).

De acuerdo a la normativa NOM-070-SCFI-2016, en la producción de mezcal se puede emplear una amplia variedad de agaves como *Agave angustifolia*, *Agave esperrima*, *Agave weberi*, *Agave potatorum* y *Agave salmiana*. En la región de San Luis Potosí, únicamente se utiliza la variedad de agave *Salmiana*, característica de la región. Existen varias mezcalerías en el estado, algunas de las cuales tienen implementados procesos artesanales. De acuerdo a la NOM-070-SCFI-2016 la elaboración de un mezcal artesanal debe cumplir con al menos las siguientes cuatro etapas y equipo:

- a) Cocción: cocimiento de cabezas de maguey o agave en hornos de pozo o elevados de mampostería.
- b) Molienda: con mazo, tahona, molino chileno o egipcio, trapiche o desgarradora.
- c) Fermentación: oquedades en piedra, suelo o tronco, piletas de mampostería, recipientes de madera o barro, pieles de animal, cuyo proceso puede incluir la fibra del maguey o agave (bagazo).
- d) Destilación: con fuego directo en alambiques de caldera de cobre u olla de barro y montera de barro, madera, cobre o acero inoxidable; cuyo proceso puede incluir la fibra del maguey o agave (bagazo).

En el proceso de la producción artesanal de mezcal se generan:

- a) Residuos de cosecha:

Hojas del rosetón de agave, que se generan en el campo al cosechar las piñas o cabezas.

- b) Residuos del proceso agroindustrial:

Los más distintivos son el bagazo y las vinazas. El bagazo se genera después de la extracción de las mieles (cocción y molienda) y se caracteriza por sus contenidos de celulosa, hemicelulosa y lignina, así como altos contenidos de materia orgánica y compuestos minerales. Las vinazas se producen después de la destilación de las mieles fermentadas y su composición es glicerol, sodio, potasio, sulfatos, magnesio entre otros componentes (Decloux *et al.*, 2002).

En 2014, Oaxaca reportó la mayor producción de mezcal en el país, con un 93.7 % de la producción total, la mayor parte de la cual (77 %) fue elaborada con agave *angustifolia*. Zacatecas fue el segundo estado productor con el 4.4 % del total y San Luis Potosí fue tercer lugar en la producción nacional. En el mismo año, el volumen total de mezcal envasado para mercado nacional fue 924, 686 L. Una estimación es que cada litro de mezcal producido, genera de 15-20 kg de bagazo en base húmeda. Con base en esta estimación, la industria del mezcal en Oaxaca produce anualmente alrededor de 122,696 T, mientras que San Luis Potosí tiene una producción aproximada de 2,400 T de bagazo, en un mercado que tiene una favorable tasa de crecimiento anual (Consejo regulador del mezcal, 2014, Chávez 2010, Martínez *et al.*, 2013, SADER, 2019). Por esta razón, es atractivo implementar algunos de procesos sugeridos en la literatura para valorizar estos residuos generados localmente. Al respecto, el grupo de trabajo postula que un enfoque sustentable es aprovechar integralmente de todos los residuos de la industria del mezcal. Para seleccionar y validar las diferentes opciones en el caso de estudio, en la Figura 2-2 se esquematiza el análisis realizado para identificar los residuos generados en las etapas de la producción del mezcal artesanal en la región del altiplano potosino. A continuación, respetando los procesos valorización de residuos de carácter “artesanal”, que tienen valor agregado, se identifican las rutas alternativas para valorizar los residuos.

De acuerdo a los residuos mostrados en la Figura 2-2, las rutas de valorización convencional y alternativa son:

**a) Estrategias convencionales de valorización de residuos**

**1. Artesanías:**

Elaboradas a partir del ixtle, que es el residuo generado en el desfibrado de las cabezas de maguey.

**2. Energía calorífica:**

Se obtiene a partir de la combustión directa del bagazo del maguey obtenido del proceso de molienda.

**3. Productos químicos: acetonas y alcoholes**

A partir de destilación fraccionada, las vinazas se pueden separar en alcoholes, acetonas, agua y sólidos. Los alcoholes y cetonas pueden ser comercializados en diversas industrias, como la farmacéutica y cosmética. El agua que se separa es enviada nuevamente al proceso de producción del mezcal y los sólidos son ricos en calcio, por lo que es posible utilizarlo como aditivos en la industria alimenticia animal.

#### **4. *Bio-fertilizantes:***

Se obtienen a partir de:

- i. Compostaje a partir de residuos provenientes de la cosecha.
- ii. Cenizas obtenidas en el proceso de combustión directa del bagazo para la producción de energía calorífica.

#### **a) *Estrategias alternativas para la valorización de residuos***

#### **5. *Alimentos funcionales:***

A partir de la hidrólisis enzimática de las podas verdes de la cosecha del maguey, se obtienen productos de la fermentación con azúcares C<sub>5</sub> y C<sub>6</sub>, con los que se pueden obtener alimentos funcionales, específicamente fructanos, a los que se les atribuye beneficios a la salud como fuente prebióticos, disponibilidad de minerales, fortalecimiento de mecanismos de defensa y el mejoramiento del metabolismo de lípidos (Ullua *et al.*, 2010).

#### **6 *Productos químicos para industria alimenticia, farmacéutica, cosmética o química***

A partir de la conversión enzimática del bagazo de agave es posible obtener compuestos fenólicos como guayacol, alcohol coniferílico, alcohol vainillínico, metoximetil fenol, metoxi-p-cresol, ácido ferúlico, ácido gálico, ácido hidroxibenzoico, alcohol cumarílico, ácido cumárico, syringaldehído, hidrozibenzaldehído, y además hidrofenoles, benzilfenoles y benzaldehídos, los cuales tienen un gran potencial para uso industrial, ya que se pueden transformar en productos de interés como aromatizantes, fármacos e incluso polímeros sintéticos tales como resinas de fenolformaldehído (Benar *et al.*, 1999).

## **7 *Biogás para cogeneración de energía***

A partir de la digestión anaerobia del bagazo generado en el proceso de cocción y molienda. El biogás producido se puede usar en un quemador para la generación de energía calorífica, en un motogenerador para obtener energía eléctrica, o en equipos de co-generación para producir simultánea y eficientemente energía calorífica y eléctrica. Por lo general, antes de su aplicación el biogás se sujeta a un proceso de limpieza (físico, químico y/o biológico), para eliminar principalmente posibles impurezas como H<sub>2</sub>S, CO<sub>2</sub> o para valorizar H<sub>2</sub> en la corriente.

## **8 *Gas de síntesis***

Obtenido de la pirólisis de bagazo y usado como combustible verde o materia prima para combustibles.

## **9 *Bioaceite***

Obtenido de la pirólisis de bagazo y usado en la síntesis de productos químicos

## **10 *Biochar***

Obtenido de la pirólisis de bagazo y con diversas aplicaciones como adsorbentes, aditivo en materiales de construcción, y aplicaciones agronómicas

En general, las empresas mezcaleras artesanales no tienen interés, no tienen la tecnología desarrollada, o no tienen capital para invertir en una tecnología para el procesamiento de sus residuos. Esta situación abre una gran área de oportunidad para aprovechar estos residuos; a partir de la investigación y el desarrollo tecnológico necesario, se puede capitalizar en la producción de productos de alto valor agregado, con las características propias de un proceso sustentable: rentabilidad económica, mitigación de los impactos ambientales y una estrategia para contribuir al bienestar económico y social.

## 2.8. Solución sustentable: Biorrefinería

Actualmente el aprovechamiento integral de la BLR se puede lograr mediante la instalación de una biorrefinería, que es un proceso que aprovecha de forma integral todas las fracciones, subproductos y residuos derivados, para producir energía eléctrica y calorífica, combustibles líquidos y sustancias químicas de alto valor agregado. Los beneficios económicos, medioambientales y sociales atribuidos a las biorrefinerías son (Routray *et al.*, 2017):

### a) Económicos:

- Proporciona valor agregado a la biomasa al fomentar su aprovechamiento integral.
- Altamente rentable debido al aprovechamiento de los subproductos generados.
- Contribuye a mejorar la competitividad de diversos sectores industriales a través de la innovación: industria química, industria forestal, farmacéutica, etc.
- Ayuda a crear fuentes de empleo asociados tanto a los procesos de transformación como a los procesos de recolección, pre-tratamiento y transporte de la biomasa.
- Contribuye a disminuir la dependencia de los combustibles fósiles.

### b) Medioambientales:

- Reduce emisiones de gases de efecto invernadero.
- Elimina los efectos negativos del uso de combustibles fósiles.

### c) Sociales:

- Fortalece la economía del medio rural al diversifican el sistema productivo y generar empleos.
- Mejora los servicios e infraestructuras en zonas rurales.

El proceso sugerido en el grupo de trabajo para promover el aprovechamiento integral de la BLR desde la perspectiva de una biorrefinería, se describe en la Figura 2-3. El proceso inicia con la selección de la materia prima, de la cual se buscan, preferentemente, los residuos de biomasa lignocelulósica agrícola y forestal y los de

biomasa usada en procesos agroindustriales. A continuación, se propone que la biomasa residual se puede convertir a través de procesos de termoquímicos, químicos y/o bioquímicos:

a) Tratamientos termoquímicos

Son aquellos donde ocurre una serie de reacciones químicas a alta temperatura, con el objetivo de descomponer la biomasa y generar principalmente energía y otros productos químicos. Los principales procesos termoquímicos son (Ábrego, 2015):

- 1) Combustión directa: es el tratamiento más empleado en biomasa para la conversión en energía calorífica (Demirbas, 2006).
- 2) Gasificación: es el tratamiento de oxidación parcial de la biomasa a alta temperatura (700-1500 C) su principal producto es gas de síntesis, que se utiliza de manera directa para la generación de energía eléctrica y calorífica, o se puede transformar en hidrocarburos líquidos mediante catálisis (Demirbas, 2006, Larson *et al.*, 2008).
- 3) Pirólisis: es el tratamiento que se lleva a cabo en atmósferas inertes (N<sub>2</sub>, He) y genera tres productos: bioaceite, gas de síntesis y biochar (Demirbas, 2006, Larson *et al.*, 2008).

En la Tabla 2-3 se presenta una comparación entre las condiciones típicas usadas para la combustión, la gasificación y la pirólisis y las principales ventajas y desventajas de estas tecnologías.

b) Tratamientos Bioquímicos:

Son procesos donde por medios biológicos, como microorganismos o enzimas, la biomasa se descompone para generar una fracción la rica en azúcares fermentables y una fracción sólida compuesta principalmente de celulosa y lignina (Ramos, 2017). En antelación al proceso biológico se puede requerir un pre-tratamiento de la muestra de biomasa, para generar los intermediarios (celulosa, hemicelulosa y lignina) que se convierten después por acción de enzimas y microorganismos en otros productos de alto valor agregado.

Tabla 2-3. Tipos de tratamiento térmico de biomasa  
(IEA, 2007, Kwapinski *et al.*, 2010, García *et al.*, 2014, Xinni 2017, You, 2017, Brown, 2009)

Proceso	Condiciones				Producto			Comparación	
	Atm	Velocidad de calentamiento	T	t residencia	Líquido	Sólido	Gas	Ventajas	Desventajas
		C/min	C	s	%	%	%		
<b>Combustión</b>	Oxígeno	N/A	300	N/A	5	15	80	<ul style="list-style-type: none"> <li>Liberación de energía en forma de calor y luz para aplicaciones domésticas e industriales</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Formación de gases de efecto invernadero como CO<sub>2</sub>.</li> </ul>
<b>Gasificación</b>	Oxígeno	2	750	10-20	5	10	85	<ul style="list-style-type: none"> <li>Obtención de un gas de síntesis con múltiples usos: producción de electricidad, combustibles, Productos químicos.</li> <li>Se evita la formación de compuestos nitrogenados, halogenados y azufrados peligrosos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Complejidad de operación.</li> <li>Limitada experiencia para el escalamiento.</li> <li>Alta demanda de energía para residuos con alto porcentaje de humedad.</li> </ul>
<b>Pirólisis lenta</b>	Inerte	2-7	400	30-1800	30	35	35	<ul style="list-style-type: none"> <li>Valorización de subproductos en otros procesos.</li> <li>Se puede regular la selectividad en función de las condiciones de operación.</li> <li>Se evita la formación de compuestos nitrogenados, halogenados y azufrados peligrosos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Alto costo de inversión inicial.</li> <li>No se tienen instalaciones de gran escala.</li> </ul>
<b>Pirólisis rápida</b>	Inerte	150	500	1	75	12	13		

## **2.9. Un enfoque local: Integración secuencial de etapas sustentables**

El esquema de la Figura 2-3 es un enfoque integral para la conversión de residuos en energía limpia, combustibles verdes y productos químicos sustentables. Si bien el ideal es integrar los procesos y los servicios necesarios para optimizar las redes de conversión de masa y energía, la realidad es que la integración de estas biorrefinerías implica tecnología, logística e inversiones que pueden ser significativas y no estar al alcance para algunas economías. Esta situación representa un reto que puede inhibir el desarrollo de estos enfoques integrales. Para atender esta situación, se han propuesto recientemente diversos enfoques. Uno de ellos es establecer mini-biorrefinerías que se adaptan al tipo y cantidad de biomasa residual disponible en una región. Sin embargo, estas unidades están también acotadas a un número limitado de productos y pueden ser poco viables económicamente. En este escenario, otra alternativa es ir desarrollando procesos de valorización de residuos agroindustriales, que sean comunes para diferentes industrias y que demandan menor inversión técnica y económica para desarrollar o implementar la tecnología que permita desarrollar paquetes tecnológicos, que puedan ser después escalados y comercializados. Una vez se cuenten con varios paquetes tecnológicos, se pueden integrar los mismos para ir generando procesos cada vez más grandes, hasta alcanzar el nivel de una biorrefinería.

En el contexto de este proyecto, la propuesta se enfoca al manejo de residuos agroindustriales sólidos, específicamente del bagazo de agave. La línea de acción seleccionada es usar el tratamiento termoquímico de los residuos, a través de pirólisis para generar tres productos, pero focalizarse en la separación, caracterización y aplicación práctica del producto sólido, validando su potencial para ser utilizado como sustrato para la producción de una especie vegetal de importancia económica la región. La apropiada integración y validación de procesos y productos puede generar un paquete tecnológico, contribuyendo así a un eslabón de la futura refinería de los residuos de la industria del mezcal.

## **2.10. Potencial de aplicación de los productos sólidos de la valorización de la biomasa residual.**

La Figura 2-4 ilustra las aplicaciones diversas de estos residuos agroindustriales sólidos. En función del nivel tecnológico o de desarrollo de las industrias, estos residuos pueden recibir diversas aplicaciones. Entre las empresas de menor nivel tecnológico, una de las opciones más comunes es dejar la biomasa en campo para que actúe como composta. La otra opción es usar esta biomasa como materia prima en hornos y/o calderas para generar energía eléctrica. Para empresas con mayor nivel de desarrollo, en las cuales existe la logística para almacenar y darle un valor agregado a estos residuos, se abre un abanico de opciones para obtener productos de mayor valor agregado. En este caso, una opción es dar a los residuos sólidos una serie de tratamientos físicos relativamente simples y económicos, para producir pellets o briquetas que se pueden comercializar a nivel residencial e industrial, para producir energía calorífica y en algunos casos, energía eléctrica. Los residuos sólidos también se pueden someter a un tratamiento termoquímico a temperaturas bajas o moderadas para generar biochar, que tiene diferentes aplicaciones de valor agregado como adsorbente o como aditivo agrícola. En un proceso termoquímico similar, pero a mayor temperatura, seguido de varios procesos de activación física o química, se puede generar carbón activado, que es un material orgánico con propiedades morfológicas y químicas superficiales regulados, que permite el desarrollo de materiales especializados para aplicación en ingeniería ambiental, en procesos catalíticos y en diferentes áreas de nanotecnología. Entre estas alternativas, este trabajo se focalizó en el estudio de la conversión de biomasa lignocelulósica residual en biochar.

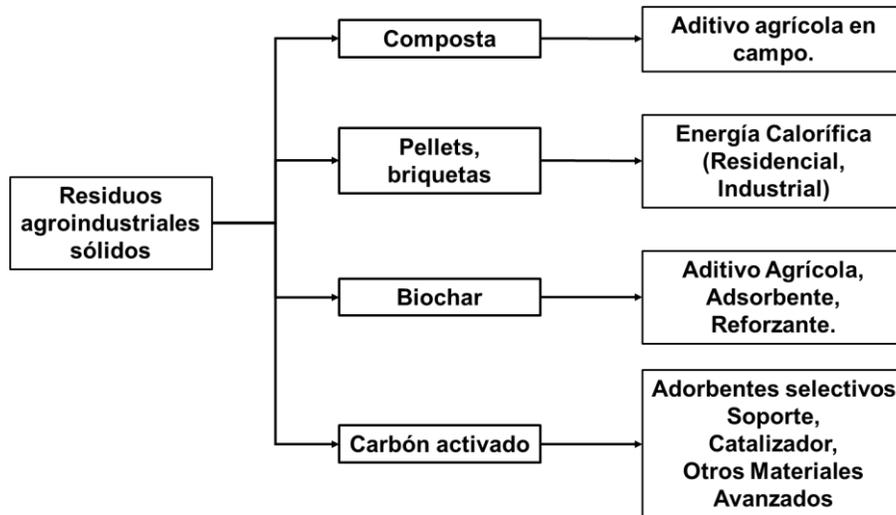


Figura 2-2. Productos de la valorización de residuos agroindustriales sólidos

A la fecha, se identifica un creciente interés de usar biochar para diferentes aplicaciones industriales, entre las cuales se distinguen el acondicionamiento y/o la remediación de suelos, así como su capacidad para retener nutrientes en aplicaciones agrícolas y la adsorción de compuestos orgánicos e inorgánicos en ingeniería ambiental (Yang *et al.*, 2015, Villar, 2018). El uso del biochar, contribuye al desarrollo de procesos sustentables desde la perspectiva de una biorrefinería; de esta forma, se identifican beneficios técnicos, ambientales, energéticos y económicos del uso del biochar, con favorables impactos para diferentes industrias (Lehmann, 2007, García *et al.*, 2014, Wang *et al.*, 2018, Weber *et al.*, 2018). Una aplicación que se revisa en mayor detalle es el potencial del biochar para actuar como sustrato en la producción de hortalizas mediante semilleros, en una primera se contienen plántulas las cuales son trasplantadas a sistemas de producción en invernaderos o campo. Los sustratos son materiales inertes distintos al suelo, de origen natural, mineral u orgánico, que permiten el anclaje del sistema radicular de la planta (Graber *et al.*, 2010) sin embargo son altamente costosos, por lo que en este trabajo se propuso evaluar al biochar como una alternativa económica y local para la producción de plántulas de tomate.

## 2.11. Pirólisis de BLR

La pirólisis consiste en el tratamiento térmico de la biomasa entre 400 y 550 C en atmósfera inerte (como N<sub>2</sub> o He), y a velocidades variables de calentamiento, la que

permite categorizar a la pirólisis en dos tipos (Masera *et al.*, 2006, Brown, 2009, Luque *et al.*, 2011):

a) *Pirólisis rápida:*

Se caracteriza por velocidades de calentamiento elevadas (150 C/s) y muy bajos tiempos de residencia del vapor en la zona de reacción; la temperatura requerida es mayor que 500 C.

b) *Pirólisis lenta:*

Se caracteriza por bajas velocidades de calentamiento (2-7 C/min) y tiempos de residencia largos, la temperatura requerida se encuentra entre 300 y 400 C.

En función de las condiciones de operación, la pirólisis genera distribuciones variables de tres tipos de productos:

**2.11.1.1. Gas de síntesis:**

Es una mezcla de gases con composición típica de 20% CO, 17% de H<sub>2</sub>, 55% de CO<sub>2</sub> y 8% de otros gases como CH<sub>4</sub>. El gas de síntesis tiene diversas formas de aprovechamiento, entre ellas (Brown, 2009, Damien, 2010, Chum *et al.*, 2011, Kirkels *et al.*, 2011, García *et al.*, 2014, Bhowmick *et al.*, 2018, Corato *et al.*, 2018):

- a) Uso directo para generación o intercambio de energía.
- b) Transformación por procesos catalíticos como Fischer-Tropsch para la generación de combustibles alternativos.
- c) Síntesis de productos químicos con diversas aplicaciones industriales.

**2.11.1.2. Bioaceite**

Es una mezcla compleja formada por compuestos orgánicos oxigenados de bajo peso molecular como metano, etanol, ácido acético, acetona y componentes oxigenados hidrofóbicos no acuosos de mayor peso molecular como alcoholes, fenoles aromáticos (benceno, tolueno e hidrocarburos aromáticos policíclicos). Esta mezcla se somete a destilación para separar los compuestos, los cuales se usan después como materia prima en procesos catalíticos para sintetizar combustibles y productos químicos de alto valor agregado con interés comercial en las industrias de alimentos, farmacéuticas y de cosméticos, por mencionar algunas de las más relevantes.

### 2.11.1.3. Biochar

El biochar es la fracción sólida que resulta de la pirólisis de biomasa. Es un sólido orgánico, formado por carbón en mayor proporción, por lo cual también se le conoce como carbón vegetal. De acuerdo con la literatura (Demirbas, 2004, Kwapinski *et al.*, 2010, Fanchini *et al.*, 2010, Liu, 2012), la pirólisis lenta rinde de 30 -35 % en peso de biochar, en función de las condiciones de operación y del tipo de reactor. Además, de los parámetros indicados en la Tabla 2-3, atmósfera del proceso, velocidad de calentamiento y temperatura de reacción, otro parámetro importante es el tamaño de partícula de la biomasa.

Está bien documentado el efecto que la temperatura de pirólisis tiene en las propiedades del biochar y, en consecuencia, sus aplicaciones.

a) Temperaturas mayores de 500 C:

El efecto del tratamiento a temperatura elevada es un aumento del área superficial (AS) y de la porosidad (más específicamente, de la distribución del tamaño de poros). Por ejemplo, Antal (2003) observó AS de 500 m<sup>2</sup>/g en un biochar obtenido a partir de pirólisis de biomasa lignocelulósica a 900 C. Sin embargo, el tratamiento en este rango de temperatura origina una disminución de grupos funcionales oxigenados como carboxílicos y carbonilos y, por lo tanto, del punto de carga cero (pH > 7).

b) Temperaturas menores de 500 C:

En este caso, el efecto de la temperatura es la disminución del área superficial (AS) y de la porosidad (volumen de poros, VP), así como de generar un punto de carga cero ácido (pH < 7).

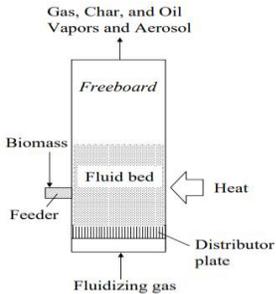
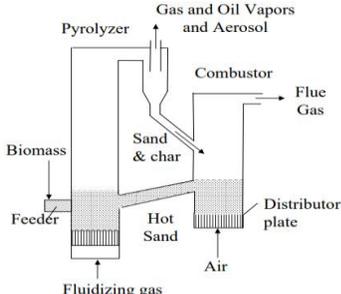
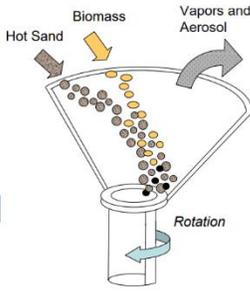
Es pertinente indicar que el tipo de materia prima utilizada también condiciona las propiedades finales del biochar. Por ejemplo, la biomasa residual que contiene metales como sodio, potasio y calcio, pueden aumentar los rendimientos de obtención del biochar, debido a que los metales presentes en la biomasa no son afectados por las reacciones de pirólisis (Antal, 2003); sin embargo, pueden generar efectos negativos en la estructura y la fertilidad de los suelos debido a que la presencia excesiva de metales interfiere con la absorción de nutrientes esenciales, así como en el crecimiento y desarrollo de los cultivos agrícolas (Kammann *et al.*, 2015; Sanchez-Monedero, 2018). Demirbas *et al.* (2004), indicaron que la BLR con mayor contenido en lignina (como los residuos

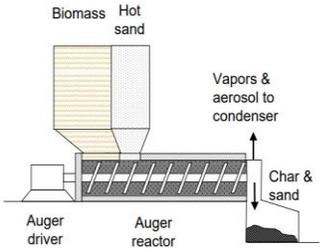
forestales) maximizan los rendimientos de producción del biochar, debido a que la lignina tiene mayor resistencia a la descomposición térmica (280-500 C) en comparación a la celulosa (240-350 C) y hemicelulosa (200-260 C).

Por otra parte, la Tabla 2-4 incluye un resumen del tipo de pirolizadores más usados en la síntesis de biochar:

- a) Reactores de lote: Se caracteriza por favorecer la producción de la fracción de biochar. Requieren control del tamaño de partícula (2mm).
  
- b) Lecho fluidizado.  
Se caracterizan por velocidad de calentamiento elevado y por permitir la carga de mezclas homogéneas de la materia prima. Requieren partículas de biomasa entre 2 y 3 mm.
  
- c) Lecho fluidizado circulante.  
Se utilizan principalmente en procesos de pirólisis rápida. Tienen la característica de una mayor producción de bioaceite, debido a las altas velocidades de calentamiento.
  
- d) Pirolizador de cono giratorio.  
Permite el mezclado previo de biomasa. Sin embargo, requiere tamaños de partículas < 2 mm.
  
- e) Reactor de barrena.  
Se caracterizan por una lenta rotación que incorpora las partículas de biomasa directamente al horno. Este tipo de reactores se comercializan para pirólisis lenta y permiten obtener mayoritariamente fracción líquida.

Tabla 2-4. Reactores usados para la pirólisis de biomasa  
(Brown, 2009)

Reactor	Características	Esquema
Lote (Batch)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Evolución de temperatura y reacción.</li> <li>• Balance energético y de masa.</li> <li>• <b>Producción preferente de biochar.</b></li> </ul>	
Lecho fluidizado	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Calor suministrado externamente.</li> <li>• Buena transferencia de masa y calor.</li> <li>• Requiere pequeñas partículas de biomasa (2-3 mm).</li> </ul>	
Lecho fluidizado circulante	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Arena caliente circulada entre combustor y pirolizador.</li> <li>• Calor suministrado con carbón ardiente.</li> <li>• Mayor producción de bioaceite.</li> </ul>	
Pirolizador de cono giratorio	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Arena y biomasa puesto en contacto dentro del cono giratorio</li> <li>• Diseño compacto y no necesita gas de arrastre.</li> <li>• Requiere partículas de biomasa muy pequeñas.</li> <li>• Es difícil de escalar.</li> </ul>	

<p>Reactor de barrena</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Arena caliente y biomasa mezclada por barrena.</li> <li>• Apto para pequeña escala.</li> <li>• Requiere arena caliente como calefacción.</li> <li>• Sistema de circulación</li> <li>• Pirólisis rápida, producción de bioaceite</li> </ul>	
---------------------------	---	---

Con base en la información anterior, el reactor más adecuado para la producción de biochar a partir de la pirólisis lenta de BLR es de semi-lote, en el cual la biomasa opera por lotes y el gas de arrastre en modo continuo. Esto permite obtener mayor rendimiento de biochar y facilita la recuperación del gas de síntesis.

## 2.12. Aplicaciones típicas del biochar

En la Tabla 2-5 se presenta un resumen de las principales aplicaciones del biochar a la fecha, se sugiere una amplia diversidad de áreas de aplicación: desde ambiental, hasta de construcción y alimenticia.

Tabla 2-5. Aplicaciones del biochar.

(Adaptación de García et al., 2014)

	Aplicación	Referencia
Ambiental	Adsorción de metales tóxicos como arsénico, cadmio y plomo en efluentes líquidos	Yokoyama <i>et al.</i> , 2012. Agrafioti <i>et al.</i> , 2014. Ungureanu <i>et al.</i> , 2015. Gude <i>et al.</i> , 2017. Wang <i>et al.</i> , 2018.
	Adsorción de antrazina en efluentes líquidos y suelos contaminados	Deng <i>et al.</i> , 2014. Tan <i>et al.</i> , 2016. Wang <i>et al.</i> , 2018.
	Adsorción de hidrocarburos aromáticos policíclicos en suelos contaminados	Zhang <i>et al.</i> , 2015. Hale <i>et al.</i> , 2016. Wang <i>et al.</i> , 2018.
Materiales	Aditivo para la fabricación de envases biodegradables.	Gerlach <i>et al.</i> , 2012
	Elaboración de electrodos en celdas de combustible	Huggins <i>et al.</i> , 2014
	Aditivo para incrementar la resistencia mecánica del concreto; la mezcla con biochar disminuye la cantidad de cemento agregado.	Akhtar <i>et al.</i> , 2018
Alimenticio	Suplemento alimenticio para aves de corral o rumiantes.	Gerlach <i>et al.</i> , 2012. Joseph <i>et al.</i> , 2015.

### 2.13. Aplicaciones agronómicas

En los procesos agrícolas, los suelos presentan degradaciones físicas, químicas y biológicas, por lo que se busca tecnologías alternativas para disminuir el impacto ambiental y económico, por lo que el biochar ha resultado una posible alternativa para contrarrestar la degradación en el suelo o dar alternativas para los procesos agrícolas (García et al., 2014). El estudio de la aplicación del biochar como enmienda orgánica (contribución de un fertilizante o material destinado a mejorar la calidad del suelo, ya sea en su estructura, composición, nutrientes, pH) permite su posible uso en la restauración y recuperación de suelos degradados, debido al elevado contenido de nutrientes para las plantas, como son el fósforo, potasio, nitrógeno, magnesio y calcio.

Por otro lado, el biochar es una forma recalcitrante de carbono, que permite retardar el retorno a la atmósfera o secuestrar el carbono en forma de CO<sub>2</sub>, por lo que es posible dar alternativas ambientales para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>. Un beneficio adicional es que la síntesis de biochar es a partir de residuos agrícolas o agroindustriales que a menudo causan problemas ambientales o problemas de logística para la industria. Así mismo, el biochar reduce la lixiviación de nutrientes y las emisiones de gases de efecto invernadero como el metano y el óxido nitroso (Gerlach et al., 2012, Wang et al., 2018, Jeffery et al., 2011) describen como parte de las aplicaciones de biochar un ciclo cerrado que tiene como concepto el uso de materiales agroindustriales para la producción de biochar que a su vez es utilizado en el saneamiento del suelo y la limpieza de agua, por mencionar algunas de las aplicaciones.

El potencial agronómico del biochar se debe siempre comparar con los sustratos comerciales específicamente diseñados para la producción de hortalizas en invernaderos. Entre estos materiales se distinguen la turba, la perlita, la vermiculita y la lana de roca. Su ventaja es que tienen un impacto favorable en la productividad, ya que hacen uso del agua y de los fertilizantes de forma más eficiente que el suelo. Sin embargo, varios de estos sustratos son importados, por lo que tienen un sobre costo y en algunos casos hay un impacto ambiental en su producción. Diversas empresas nacionales como ecoHuerto y Plántulas Alfaro requieren sustratos para la producción de plántulas de especies vegetales como: jitomate, lechuga, chile, brócoli, acelga, espinaca,

arúgula, cebolla, betabel, ejote, entre otras. Por esta razón, una arista interesante desde el punto de vista técnico, ambiental y económico es el documentar el uso de biochar como reemplazo de sustratos comerciales (Dumroese *et al.*, 2011, Tian *et al.*, 2012, Petter *et al.*, 2012, Northup *et al.*, 2013).

La Tabla 2-6 resume el estado del arte en la aplicación de biochar como sustrato agrícola, incluye los principales trabajos donde se reporta las mejoras de las funciones del suelo y la aportación de nutrientes a mezclas de biochar-suelo y biochar sustrato. El biochar obtenido proviene de diversas fuentes de biomasa, preferentemente residual y por conversión de procesos termoquímicos como la pirólisis y la gasificación. Zwieter *et al.*, (2010) reporta que en comparación con suelo ("ferrosol") se detecta una mayor actividad microbiana benéfica para cultivos como rábano, trigo y soja, el estudio se realizó a nivel laboratorio. Brantley *et al.* (2015) sugieren que la aplicación de biochar aumenta la capacidad de retención de nutrimentos en el suelo, mejoras en la textura, la aireación del suelo y su capacidad de retención de agua, presentando beneficios como reducir la cantidad de fertilizantes aplicadas en variedades vegetales como maíz, soja, algodón, tomate, berenjena. Por otro lado, Gallo-Saravia *et al.*, (2019), propone el uso de biochar, como alternativa de sustrato en cultivos de tomate y reporta beneficios desde el punto de vista económico y ambiental. Con base a los resultados mostrados en la Tabla 2-6 y de acuerdo con otros autores, el biochar, ya sea como sustrato o como parte de una mezcla de sustratos comerciales, constituye una alternativa sustentable para la producción de hortalizas (Tian *et al.*, 2012, Vaughn *et al.*, 2015).

El uso de biochar en México, ha sido poco empleado por lo que representa una alternativa tecnológica para productores del sector agrícola. La anterior revisión valida que el biochar contribuye al desarrollo de procesos sustentables desde la perspectiva de una biorrefinería. En este escenario, el propósito del proyecto es valorizar el biochar derivado de la conversión de BLR de una industria local, determinando su potencial como sustrato agrícola, con lo que se pretende generar beneficios técnicos y económicos.

Tabla 2-6. Aplicaciones agronómicas de biochar

Referencia	Materia Prima	Método de tratamiento	Características de biochar	Nivel de estudio	Especie	Indicador Funcional	Resultados / Beneficios
<b>Gaskin et al. (2010),</b>	Cascara de maní	"Pirólisis 400 C"	<b>pH:10.12</b> % C: 72.85 % % N:19 % C:N: 38	Campo	Maíz	Químico: Nutrientes en el suelo: estado y rendimiento en la composición de nutrientes de del cultivo.	"Efecto a corto plazo sobre el pH del suelo y el aumento de K, Ca y Mg. No se reportó efecto en los nutrientes del maíz."
<b>Zwieten et al. (2010)</b>	Residuos de papelera	Pirólisis lenta 550 C	<b>pH:9.</b> % C: 50 %N:0.48 <b>BET: 115 m<sup>2</sup>g<sup>-1</sup></b>	Laboratorio	Rábano, trigo y soya.	Número de semillas germinadas. Actividad microbiana benéfica. Cantidad de biomasa.	En comparación con suelo ("ferrosol") se detecta una mayor actividad microbiana.. Mayor número de semillas germinadas.
<b>Brantley et al. (2015)</b>	Astillas de madera de pino	Pirólisis 500 C	<b>pH:8.7</b> % C: 24.45 %N:0.07 Relación C:N: 366:1 E.C: 5.3 dS·m <sup>-1</sup>	Campo	Maíz	Monitoreo de la cantidad de nutrientes. Rendimiento del cultivo (producción).	Mezcla Biochar-Fertilizante aumentó el rendimiento del cultivo.

<b>Villar et al. (2018)</b>	Podas de olivos	Pirólisis lenta 450 C	<b>pH: 9.5</b> E.C: 1.4 dS·m <sup>-1</sup> % C: 64.2 % N: 1.21	Maceta	Colza, pimienta, garbanzo, soja, algodón, tomate, berenjena	Rendimiento del cultivo. Biomasa. Área foliar.	Mayor desarrollo de biomasa aérea, área foliar específica y contenido relativo de agua en la hoja. Producción mejorada del cultivo.
<b>Gallo-Saravia et al., 2019</b>	Cascarilla de arroz	Gasificación Lecho fijo contracorriente.	<b>pH: ND</b> % C: 75.22 % N:2.10	Vivero	Jitomate	Madurez fisiológica de la planta: cantidad de plantas germinadas, cantidad de frutos promedio, diámetro peso del fruto.	Mezclas de sustrato-biochar: Biochar es una alternativa de sustrato en cultivos de tomate. Uso de biochar (incluso en proporciones bajas) tiene beneficios desde el punto de vista económico y ambiental.
	Residuos de madera de pino		<b>pH: ND</b> % C: 56.82 % N: 3.43 %				

### 3. **ÁREA DE OPORTUNIDAD**

En la búsqueda de sistemas agrícolas de interés local que requieran biochar como aditivo agrícola, se evaluó inicialmente opciones de cultivo en campo que demandan este tipo de aditivos, como:

- a) Tomate, que demanda el uso de fibra de coco.
- b) Pimiento morrón, que demanda el uso de fibra de coco y lana de roca.

Sin embargo, dado que el proceso de producción de biochar se lleva a cabo en esta etapa a nivel laboratorio, la cantidad de biochar disponible es muy limitada para la validación de su potencial agrícola en campo. Por esta razón, se buscaron otras opciones y, en este escenario, se consideró la producción de plántulas de hortalizas bajo el sistema de invernaderos, que también implica el uso de sustratos agrícolas.

En relación a la elección de un sistema local pertinente para evaluar el potencial del biochar como aditivo agrícola, se hace referencia a que en San Luis Potosí (SLP), existen aproximadamente 500 Ha para la producción de hortalizas en invernadero, principalmente tomate y diferentes variedades de pimientos (SAGARPA, 2013). Estos invernaderos o estructuras de protección se encuentran ubicadas en la zona centro y la zona media de SLP, destacando los municipios de Ciudad Fernández, Ébano, Rio Verde y Zaragoza. Estas regiones se caracterizan por su clima semiárido con precipitación menor de 500 mm al año, suelos pobres y con alta susceptibilidad a la salinidad y degradación, por lo que cuentan con un potencial para la implementación de cultivos sin suelo. Se hace referencia que México es el principal proveedor mundial de jitomate, con una participación en el mercado internacional de 25.11%, que equivale a 1.61 millones de T exportadas, posicionándose como líder a nivel internacional. San Luis Potosí, junto con otros estados (Aguascalientes, Durango, Guanajuato, Hidalgo, Jalisco, Estado de México, Querétaro y Zacatecas), forman una región históricamente productora, con una superficie cosechada de 3,499.37 Ha, que corresponde a 7.08% de la producción nacional, con Precio Medio Rural de \$ 7,262 /T (SENER, 2016). Este tipo de agricultura protegida, emplea semilleros que permiten la obtención de plántulas de tomate, las cuales se trasplantan a sistemas de producción en invernaderos o campo. Para la producción de las plántulas. La documentación anterior valida la necesidad y la oportunidad de evaluar el potencial del biochar, obtenido a partir de BLR de una industrial local (bagazo

de *Agave Salmiana*), como sustrato o mezcla de sustrato para la producción de plántulas de tomate.

El cultivo de hortalizas emplea semilleros que permiten la obtención de plántulas, las cuales son trasplantadas a sistemas de producción en invernaderos o campo. Empresas nacionales como EcoHuerto y Plántulas Alfaro, comercializan diversas especies vegetales como: jitomates, lechugas, chiles, brócoli, acelgas, espinacas, arúgulas, cebolla, betabel, ejotes, entre otras. Específicamente, el proceso de producción de jitomate se muestra en la Figura 3-1, el proceso consta de las siguientes etapas (Leon *et al.*, 2016):

a) Etapa 1: Producción de plántula:

Siembra de semillas en un sustrato comercial. El sustrato más utilizado es el producto "Peat Moss", que es un musgo que pertenece al género *Sphagnum*; se caracteriza por su elevada capacidad de retención de humedad (~70%) y un alto contenido de materia orgánica (Zarate, 2014). El tiempo estimado de crecimiento de la plántula es 45 días, durante los cuales se requiere el riego diario y la aplicación de fertilizante. En este periodo se monitorea el crecimiento y la calidad de la plántula.

b) Etapa 2: Trasplante de plántula:

Una vez que la plántula alcanza su madurez fisiológica, determinada mediante la prueba de raíz, se trasplanta a un invernadero hidropónico donde se emplea como sustrato un producto comercial, en este caso "fibra de coco". Esta etapa requiere del riego diario y la aplicación de fertilizantes, así como la poda a la planta una vez al mes.

c) Etapa 3: Cosecha:

El tiempo estimado para la obtención de tomate es 10 a 12 semanas después del trasplante, una vez concluido el periodo de desarrollo, se lleva a cabo la cosecha, se limpia la zona y comienza nuevamente el ciclo de producción.

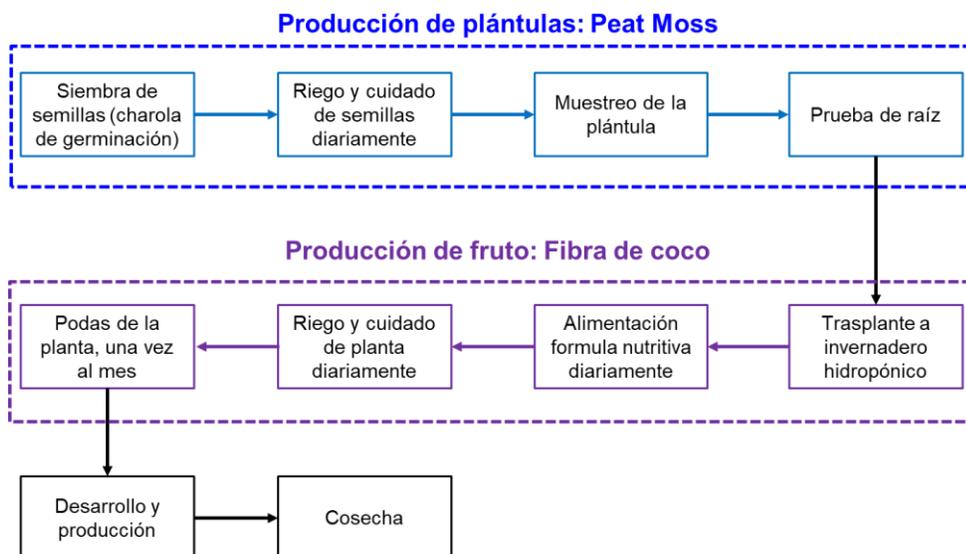


Figura 3-1. Diagrama de producción de jitomate

Se hace notar que los aditivos comerciales que se agregan en las diferentes etapas proporcionan ventajas respecto al uso de suelo, entre las que destacan (Fonteno, 2009):

- a) Proporciona anclaje y soporte para la planta.
- b) Disponibilidad de nutrientes para la planta.
- c) Permite el intercambio de gases entre las raíces y la atmosfera.
- d) Uso eficiente del agua y de fertilizantes

Además de los ya mencionados, Peat Moss y fibra de coco, los sustratos usados hoy día, tales como turba, perlita, vermiculita, lana de roca, son importados en muchas ocasiones, originando sobrecostos para el sistema de producción; además, hay diversos temas de impacto ambiental durante su producción comercial. Estos factores motivan la búsqueda de aditivos agrícolas que, con las mismas propiedades funcionales, tengan menor costo y sean inocuos en términos de impacto ambiental. Ambas características son distintivas del biochar, que se ha evaluado como reemplazo de sustratos comerciales (Dumroese *et al.*, 2011, Petter *et al.*, 2012, Tian, *et al.*, 2012, Northup, 2013, Gu *et al.*, 2013, Vaughn *et al.*, 2013, Dispenza *et al.*, 2014, Vaughn *et al.*, 2015). De esta forma, el uso del biochar constituye una alternativa ambiental y económica ya sea como sustrato o como componente en una mezcla de sustratos para la producción de hortalizas (Tian *et al.*, 2012, Vaughn *et al.*, 2015).

Por otra parte, la validación del uso favorable de biochar como sustrato agrícola en invernaderos, establece la pauta para que después se pueda usar en cultivo de campo. Por esta razón, se buscaron sistemas agrícolas de interés local a nivel de invernaderos y de campo y la opción seleccionada fue el jitomate.

Con base en las estadísticas la Planeación Agrícola Nacional 2017-2030, SAGARPA ha identificado las siguientes áreas de oportunidad para el desarrollo estratégico de la región:

- a) Desarrollar un paquete tecnológico integral y asegurar su provisión conforme a los requerimientos de la especie.
- b) Impulsar la agricultura protegida.
- c) Reducir la utilización de químicos en el cultivo.
- d) Minimizar los costos de producción.
- e) Promover el uso eficiente de recursos hídricos, fertilizantes y nutrientes.

Con base a lo anterior, el biochar tiene elementos para contribuir al desarrollo sustentable de la producción de jitomate en la región. De esta forma, en esta tesis se evalúa el potencial del biochar, obtenido a partir de un residuo lignocelulósico bagazo de *Agave Salmiana*, residuo generado en una agroindustria local, como sustrato o mezcla de sustrato para la producción de plántulas de jitomate.

Para la atención de esta área de oportunidad se propone un proyecto interdisciplinar, con la participación de químicos e ingenieros químicos para guiar los procesos de síntesis del biochar a partir de BLR mediante el tratamiento pirólisis lenta, así como la caracterización fisicoquímica de la materia prima y del biochar. Participan también especialistas en agronomía, para el desarrollo de las pruebas funcionales que validaran el potencial del biochar como sustrato alternativo para plántulas de jitomate en invernadero.

#### 4. JUSTIFICACIÓN

El proyecto atiende un área de oportunidad para valorizar residuos lignocelulósicos de la industria local y los resultados del mismo pueden tener implicaciones prácticas y económicas a corto plazo. Además, favorece el desarrollo de procesos/productos sustentables, como se delinea a continuación.

El concepto de sustentabilidad implica que un proceso, producto o servicio, cumpla con diferentes aristas o criterios; para el caso de la producción de biochar y su aplicación como aditivo agrícola, el nivel cualitativo de cumplimiento es el siguiente.

##### a) **Técnico-científico**

Se obtiene un material con las propiedades físicas y químicas necesarias para validar ó sustentar su adecuada aplicación funcional, en este caso para promover el crecimiento de plántulas de jitomate, en las condiciones que se usan actualmente por los productores.

##### b) **Económico**

La sustitución, total o parcial, de los aditivos agrícolas comerciales actualmente disponibles por biochar, producido localmente a partir de residuos, significa un favorable ahorro económico, que debe ser validado por un análisis técnico-económico que incluya el balance integral de los costos de producción.

##### c) **Sociales:**

El valorizar un residuo agrícola es una oportunidad para contribuir al desarrollo económico de una empresa rural que, por su ubicación e impacto, tendrá elementos para mejorar salarios y condiciones de vida de las comunidades a su alrededor.

##### d) **Ambientales:**

La Figura 4-1 ilustra el ciclo de vida de la biomasa desde la perspectiva de este proyecto. Durante el cultivo, las plantas remueven el CO<sub>2</sub> de la atmósfera a través del proceso de fotosíntesis, que permite el crecimiento de la planta y la generación de O<sub>2</sub> a la atmósfera. Una vez que la biomasa alcanza el punto de cosecha, se procede a su

procesamiento a partir de una serie de procesos físicos y termoquímicos como la pirólisis que permiten su conversión de gases, bioaceite y biochar. Los gases y líquidos se pueden transformar para obtener energía eléctrica y calorífica, así como productos químicos que serán usados por los consumidores y que, al final de la cadena, desprende CO<sub>2</sub> a la atmósfera. Sin embargo, se hace notar dos elementos importantes:

a) La máxima cantidad de CO<sub>2</sub> que se desprendería al final de la cadena es, por un balance de masa elemental, igual al CO<sub>2</sub> capturado y procesado por la planta en su proceso de cultivo. Por esta razón, no hay una adición neta de CO<sub>2</sub> a la atmósfera.

b) El hecho de que uno de los productos de la pirólisis sea el biochar, y que el mismo se utilice como aditivo agrícola, implica que parte del carbono de la planta es “secuestrado” por el suelo y acota la cantidad de CO<sub>2</sub> que se libera a la atmósfera al final del ciclo de vida.

En consecuencia, se estima que en este proceso es posible el “secuestro” de 25 a 50% del carbono que se podría liberar a la atmósfera como CO<sub>2</sub>. Notoriamente, el proceso contribuye a disminuir la concentración de gases que causan el efecto invernadero en la atmósfera, teniendo así un impacto positivo desde el punto de vista ambiental.

Las consideraciones antes indicadas documentan la sustentabilidad del proceso propuesto.

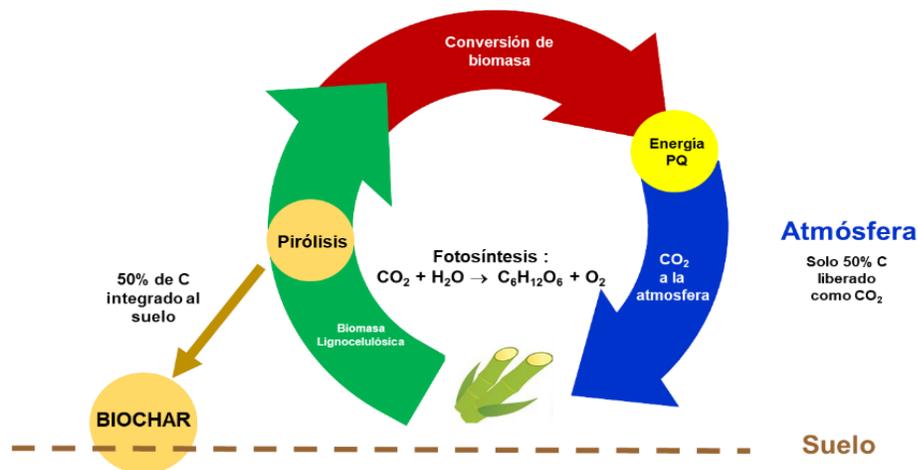


Figura 4-1. Ciclo sustentable optimizado para el uso industrial de biomasa lignocelulósica

## 5. HIPÓTESIS

La pirólisis del bagazo de agave, material residual en una industria mezcalera local, bajo condiciones de tratamiento térmico moderado, es una alternativa para producir biochar que se puede usar para reemplazar total o parcialmente al Peat Moss, como sustrato en la producción en semillero de plántulas de jitomate, con impacto favorable en la sustentabilidad del proceso.

Específicamente, los impactos más relevantes son.

- **Técnico:** El biochar producido del bagazo de *Agave Salmiana*, como alternativa para sustrato orgánico, favorece el crecimiento de plántulas de jitomate, especie de interés comercial en San Luis Potosí.
- **Ambiental:** El uso de biochar es una forma de evitar el desprendimiento de C a la atmósfera como gases de efecto invernadero, contribuyendo a la mitigación de problemas ambientales.
- **Económicas:** El biochar tiene bajo costo de producción, por ser un producto de la valorización de un residuo lignocelulósico y por las condiciones experimentales utilizadas, y significa un potencial ahorro en la compra de sustratos para los productores de plántulas de jitomate.

## **6. OBJETIVO**

### **6.1. Objetivo general**

Obtener biochar a partir de la pirólisis de bagazo de *Agave Salmiana* generado como residuo de una industria mezcalera, para validar su aplicación directa como sustrato en la producción de plántulas de *Solanum lycopersicum*, evaluando comparativamente su potencial contra un sustrato comercial (Peat Moss).

### **6.2. Objetivos específicos**

- a) Caracterizar las propiedades físicas y químicas del bagazo de *Agave Salmiana*, residual en una industrial mezcalera local, y establecer las condiciones para la pirólisis del mismo.
- b) Implementar un sistema de tratamiento a nivel laboratorio y establecer una metodología para la pirólisis lenta de biomasa lignocelulósica residual.
- c) Caracterizar las propiedades físicas y químicas del biochar para determinar el efecto de las condiciones de pirólisis y compararlas con las de un sustrato comercial (Peat Moss).
- d) Comparar el potencial agronómico del biochar y del Peat Moss en la producción de plántulas de *Solanum lycopersicum* (tomate) en un sistema de cultivo sin suelo.

## 7. METODOLOGÍA

## 8. RESULTADOS

## 9. CONCLUSIONES

Se ha validado la hipótesis planteada y se han evaluado los impactos más relevantes:

### **Técnicos:**

- Se identificaron y documentaron las posibles aplicaciones de los residuos de la agroindustria local.
- Se diseñó y construyó un pirolizador a escala laboratorio para la pirólisis de biochar.
- Se implementaron y validaron las técnicas de caracterización química usadas en la caracterización del bagazo y del biochar.
- Se validó la pirólisis de bagazo de *Agave Salmiana* en atmósfera inerte a 350 C, para la producción preferente de biochar de uso directo en aplicaciones agrícolas.
- Se evaluó el potencial del biochar como aditivo agrícola para el crecimiento de tomate (*Solanum lycopersicum*).
- A partir del día 15 de germinación, las mezclas con 25 y 50 % de biochar lograron valores de desarrollo de hojas, altura y grosor del tallo, sin diferencias estadísticas en comparación al control.

### **Ambiental**

- El uso de biochar es una forma de evitar el desprendimiento de C a la atmósfera como gases de efecto invernadero, contribuyendo a la mitigación de problemas ambientales. Se estima que con el proceso de pirólisis de estudio es posible es secuestro del 29% de C.

### **Económicas**

- El costo de producción del biochar por kilogramo se estimó en \$48.39, por lo que tiene bajo costo de producción, por ser un producto de la valorización de un residuo lignocelulósico y por las condiciones experimentales utilizadas, y significa un potencial ahorro del 30% en comparación con el costo comercial de Peat Moss que es de \$70.00 por kg.

## 10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abad B, M. B. (2004). Los sustratos en los cultivos sin suelo. En M. Urrestarazu, Tratado de cultivo sin suelo (págs. 113-158). Madrid, España: Mundi-Prensa.
- Abrego J. (2015). Procesos termoquímicos: obteniendo energía a partir de biomasa y residuos. Obtenido de ENERGÍA Y MINERÍA: <https://energia.jcyl.es/web/es/biblioteca/procesos-termoquimicos.html>
- Adell A. (2007). Fundamentos de la Producción de Pastas Celulósicas, Tema 2, Análisis Químico de Materias Primas Fibrosas.
- Agilent Technologies. (2015). <https://www.agilent.com>. Obtenido de <https://www.agilent.com/cs/library/troubleshootingguide/public/technicaloverview-ICP-MS-guide-5994-0860es-es-agilent.pdf>
- Agrafioti E, K. D. (2014). Arsenic and chromium removal from water using biochars derived from rice husk, organic solid wastes and sewage sludge. *Journal of Environmental Management*, 133, 309–314.
- Antal, M. (2003). The Art, Science, and Technology of Charcoal Production. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 42(8), 1619-1640.
- Amonette J.E., J. S. (2009). Characteristics of Biochar: Microchemical Properties. En J. S. Lehmann J, *Biochar for Environmental Management* (págs. 33-52). Gateshead, UK: Earthscan Publishing.
- Akhtar, A. &.c. (2018). Novel biochar-concrete composites: Manufacturing, characterization and evaluation of the mechanical properties. *Science of The Total Environment*, 617(616), 408–416.
- APPA. (2018). Asociación de Empresas de Energías Renovables. Obtenido de APPA: <https://www.appa.es/appa-biomasa/que-es-la-biomasa/>.
- Baena, E.. (2005). Aprovechamiento del Bagazo del Maguey Verde (Agave Salmiana) de la Agroindustria del Mezcal en San Luis Potosí para la Producción de Hongo Ostra (Pleurotus ostreatus). México: IPICYT.
- Baldock, J. (. (2007). Composition and cycling of organic carbon in soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 10, 1-35.
- Baker, N. (2008). Chlorophyll fluorescence: a probe of photosynthesis in vivo. *Annual Review of Plant Biology*, 59, 89–113.
- Benar P, G. A. (1999). Eucalyptus organosolv lignins: study of the hydroxymethylation and use in resols. *Bioresource Technology*, 68(1), 11-16.
- Bergman, P. C. (2005). orrefaction for biomass upgrading. Conference proceedings of 14th european biomass conference and exhibition. *European Biomass Conference and Exhibition*, 17-21.
- Bhagwanrao SV, S. M. (2014). Bulk density of biomass and particle density of their briquettes. *International Journal of Agricultural Engineering*, 7(1), 221-224.
- Bhowmick D.B, S. A. (2018). Lignocellulosic biorefinery as a model for sustainable development of biofuels and value added products. *Bioresource Technology*, 1144–1154.
- Brantley K, S. M. (2015). Pine Woodchip Biochar Impact on Soil Nutrient Concentrations and Corn Yield in a Silt Loam in the Mid-Southern U.S. *Agriculture*, 5(1), 30-47.
- Brebu, M. a. (2010). Thermal degradation of lignin-A review. *Cellulose Chemistry and Technology*, 44(9), 353-363.
- Brewer, C. C. (2014). New approaches to measuring biochar density and porosity. *Biomass and bioenergy*, 66(10), 176–185.
- Bridgeman, T. G. (2018). Torrefaction of reed canary grass, wheat straw and willow to enhance solid fuel qualities and combustion Properties. *Fuel*, 87(6), 844–856.

- Brown, R. (2009). Biochar production technology. En J. J. Lehmann, *Biochar for Environmental Management: Science and Technology* (págs. 127–146). Gateshead, UK: Earthscan .
- Brownsort, P. (2009). *Biomass pyrolysis processes: performance parameters and their influence on biochar system benefits*. Edimburgo: University of Edinburgh.
- Bustamante V, C. A. (2016). Ensayo Técnico, Química de la biomasa vegetal y su efecto en el rendimiento durante la torrefacción: revisión. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 7(38), 5-24.
- Cao, X. L. (2014). Comparative study of the pyrolysis of lignocellulose and its major components: Characterization and overall distribution of their biochars and volatiles. *Bioresource Technology*, 155, 21-27.
- Cetin, E. M. (2004). Influence of pyrolysis conditions on the structure and gasification reactivity of biomass chars. *Fuel*, 83, 2139-2150.
- CFE, T. v. (2020). CFE. Obtenido de CFE, Tarifas vigentes: <https://www.cfe.mx/tarifas/Pages/Tarifas.aspx>
- Chen-Lopez, C. (2018). PRO-MIX. Obtenido de PRO-MIX: Rol del calcio en el cultivo de plantas, <https://www.pthorticulture.com/es/centro-de-formacion/rol-del-calcio-en-el-cultivo-de-plantas>
- Cheng, J. (2009). *Biomass to renewable energy processes*. Boca Raton.
- Chum, H. F. (2011). Bioenergy. En: IPCC special report on renewable energy sources and climate change mitigation. *Renewable Energy Sources and Climate Change*, 209-332.
- Cobbett, C. (2002). Phytochelatins and Metallothioneins: Roles in Heavy Metal Detoxification and Homeostasis. *Annual Review of Plant Biology*, 53, 159-182.
- Consejo Regulador Mezcal, C. R. (2016). Consejo Regulador de Mezcal. Obtenido de Consejo Regulador de Mezcal: [crm.org.mx](http://crm.org.mx)
- Corato U, B. I. (2018). Assessing the main opportunities of integrated biorefining from agro-bioenergy co/by-products and agroindustrial residues into high-value added products associated to some emerging markets: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 88, 326-346.
- Cornelissen, S. K. (2012). The role of bioenergy in a fully sustainable global energy system. *Biomass and Bioenergy*, 41, 21-33.
- Creutzig, F. (2015). Bioenergy and climate change mitigation: an assessment. *GCB-BIOENERGY*, 7(5), 916-944.
- Damien, A. (2010). *La biomasa. Fundamentos, tecnologías y aplicaciones*. España: Mundi-Prensa.
- Decloux, M. (2002). Interest of electro dialysis to reduce potassium level in vinasses preliminary experiment. *Management and Research*, 29(12), 393-398.
- De Lucas A, D. P. (2012). *Biomasa, Biocombustible y Sostenibilidad*. Valladolid, España: Centro Tecnológico Agrario y Agroalimentario.
- Delegación SADER San Luis Potosí, M. P. (2019). Delegación SADER San Luis Potosí, Mezcates Potosinos. Obtenido de Delegación SADER San Luis Potosí, Mezcates Potosinos: <https://www.gob.mx/agricultura/sanluispotosi/articulos/mezcates-potosinos?idiom=es>
- Demirbas A., J. (2004). Determination of calorific values of bio-chars and pyro-oils from pyrolysis of beech trunkbarks. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 72(2), 215–219.
- Deng H, Y. H. (2014). Sorption of Atrazine in Tropical Soil by Biochar Prepared from Cassava Waste. *BioResources*, 9(4), 6627–6643.
- Dispenza, V. A. (2014). *Uso de biochar como sustrato alternativo en el cultivo de especies ornamentales en macetas*. Palermo: Departamento de Ciencias Agrícolas y Forestales .
- Downey, M. D. (2006). Cultural practice and environmental impacts on the flavonoid composition of grapes and wine: A review. *American Journal of Enology and Viticulture*, 57(3), 257-268.

- Downie, A. C. (2009). Physical properties of biochar. En J. J. Lehmann, *Biochar for Environmental Management: Science and Technology* (págs. 13-30). Gateshead, UK: Earthscan.
- Dumroese, R. K. (2011). Pelleted biochar: Chemical and physical properties show potential use as a substrate in container nurseries. *Biomass and bioenergy*, 35(5), 2018-2027.
- Fanchini, C. T. (2010). Production of xylanolytic enzymes by *Penicillium janczewskii*. *Bioresource Technology*, 101(11), 4139-4143.
- FAO. (2008). FAO. Obtenido de FAO: <http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/clasificacion-de-suelos/sistemas-numericos/propiedades-quimicas/es/>.
- FAO. (2015). FAO. Obtenido de FAO: <http://www.fao.org/conservation-agriculture/en/>
- Faus-Badia, A. (2010). Sustratos alternativos para cultivos de exterior valorizacion de residuos organicos y ensayos. *Gestion de viverosa forestales, 2020-2041*.
- Favaro L, C. L. (2017). Production of bioethanol from multiple waste streams of rice milling. *Bioresource Technology*, 24(1), 151-159.
- Fengel D, G. W. (1989). Wood chemistry, ultrastructure. *Journal of Polymer Science*, 613.
- Fonteno, D. (2009). Sustratos: tipos y propiedades físicas químicas. *Agua, sustratos y nutrición*, 93-123.
- Gallo-Saravia M, L.-S. L.-Z. (2018). Evaluación de biochar como alternativa de sustrato en cultivos de tomate. *Scientia et Technica*, 23(2), 297-302.
- García, C. R. (2014). *Enmiendas orgánicas de nueva generación: Biochar y otras biomoléculas*. Madrid, España: Mundi-Prensa.
- Garrido T, M. J. (2004). Efecto de la materia orgánica soluble de los biosólidos sobre la desorción de cobre en suelos. Santiago, Chile: Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo.
- Gaskin, J. W. (2008). Effect of low-temperature pyrolysis conditions on biochar for agricultural use. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 51(6), 2061-2069.
- Gerlach, H. S.-P. (2012). Biochar in poultry farming. *ithakajournal*, 262–264.
- Gomez-Rico M, F. F.-G. (2005). Thermogravimetric study of different sewage sludges and their relationship with the nitrogen content. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 74(1), 421–428.
- Glaser, B. B. (2000). Black carbon in density fractions of anthropogenic soils of the Brazilian Amazon region. *Organic Geochemistry*, 31(7), 669-678.
- Graber, E. R. (2010). Biochar impact on development and productivity of pepper and tomato grown in fertigated soilless media. *Plant and Soil*, 337(1-2), 481-496.
- Grichko, V. G. (2001). Ethylene and flooding stress in plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 39(1), 1-9.
- Gu, M. L. (2013). Growth of 'Fireworks' gomphrena grown in substrates amended with biochar. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 11(1), 819-821.
- Gude J CJ, R. L. (2017). As (III) oxidation by MnO<sub>2</sub> during groundwater treatment. *Water Research*, 111, 41–51.
- Hale SE, A. H. (2016). A synthesis of parameters related to the binding of neutral organic compounds to charcoal. *Chemosphere*, 144(2), 65–74.
- Haslett, B. R. (2001). Zinc mobility in wheat: uptake and distribution of zinc applied to leaves or roots. *Annals of Botany*, 87(3), 379-386.
- Heredia, E. (2014). Bagazos de *Agave salmiana* y *Agave weberi* utilizados como sustrato para producir *Pleurotus ostreatus*. México: Handle.
- Hernández C., P. C. (2008). Uso de Sustratos Orgánicos para la Producción de Tomate en Invernadero. *Agricultura Técnica en México*, 34(1), 69-74.

- Hoshi, T. (2001). Growth promotion of tea trees by putting bamboo charcoal in soil. *Culture and Science*, 17(3), 147–150.
- Hossain MK, S. V. (2011). Influence of pyrolysis temperature on production and nutrient properties of wastewater sludge biochar. *Environ Manage*, 92(1), 223-228.
- Huang Y, L. F. (2018). Lignin Content of Agro-forestry Biomass Negatively Affects the Resultant Biochar pH. *BioResources*, 13(3), 5153-5163.
- Huang, Z. J. (2004). Effects of nitrogen deficiency on gas exchange, chlorophyll fluorescence, and antioxidant enzymes in leaves of rice plant. *Photosynthetica*, 42(1), 357-364.
- Huggins, T. W. (2014). Biochar as a sustainable electrode material for electricity production in microbial fuel cells. *Bioresour. Technol*, 157(1), 114–119.
- Ibercib, Tecnologías, I. -N. (s.f.). IberCib. Obtenido de IberCib : [www.ibercib.es](http://www.ibercib.es).
- IEA. (2007). *World Energy Outlook*. Paris, Francia: International Energy Agency.
- Inyang, M. G. (2011). Enhanced lead sorption by biochar derived from anaerobically digested sugarcane bagasse. *Separation Science and Technology*, 42(12), 1950–1956.
- Instruction Manual MINI-PAM-II, I. m. (2014). *Manual for Touchscreen Operation*. Berlin. Alemania: Heinz Walz.
- Jeffery, S. V. (2011). A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 144(1), 175-187.
- Joseph, S. D. (2015). Feeding biochar to cows: An innovative solution for improving soil fertility and farm. *Pedosphere*, 25(5), 666–679.
- Jung, J. H. (2013). Comparison of biochar properties from biomass residues produced by slow pyrolysis at 500 C. *Bioresource Technology Volume*, 148, 196-201.
- Kammann, C. S.-P.-W. (2015). Plant growth improvement mediated by nitrate capture in co-composted biochar. *Scientific Reports*, 5, 1-13.
- Kan T, S. V. (2016). ignocellulosic biomass pyrolysis: a review of product properties and effects of pyrolysis parameters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57(C), 1126–1140.
- Kim KH, K. J. (2012). Influence of pyrolysis temperature on physicochemical properties of biochar obtained from the fast pyrolysis of pitch pine (*Pinus rigida*). *Bioresour Technol*, 118, 158-162.
- Kirkels, A. y. (2011). Biomass gasification: Still promising? A 30-year global overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 471-481.
- Kwapinski, W. B. (2010). Biochar from biomass and waste. *Waste Biomas*, 177(89), 177–189.
- Lal, R. (2010). Managing soils and ecosystems for mitigating anthropogenic carbon emissions and advancing global food security. *Bioscience*, 60(9), 708-721.
- Lam PS, S. S. (2014). *Engineering and Science of Biomass Feedstock Production and Provision*. Springer New York, 17–35.
- Larson, E. (2008). *Biofuel production technologies: status, prospects and implications for trade and development*. Geneva, Switzerland: UNCTAD.
- Lee, J. K.-H. (2017). Biochar as a Catalyst. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77, 70-79.
- Lehmann J, J. S. (2009). Biochar Production Technology. En J. S. Lehmann J, *Biochar for Environmental Management* (págs. 127-146). Gateshead, UK: Earthscan.
- Lehmann, J. (2007). A handful of carbon. *Nature*, 447(7141), 143–44.
- Lehmann, J. M. (2011). Adsorption of copper and zinc by biochars produced from pyrolysis of hardwood and corn straw in aqueous solution. *Bioresource Technology*, 102(19), 8877–8884.

- Leon, C., Delgado, B., Rovira, Pitty, F., & González. (2016). Ingeniería de Proyectos Agrícolas. Revista Calameo, 50-56.
- Leskovar, I. (2001). Producción y ecofisiología del trasplante hortícola. Texas: Horticultural Sciences Department.
- Lima, R. L. (2013). Evaluación de la composición química y propiedades físicas de madera y corteza de cuatro coníferas para la producción de bioenergía. México : Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Lines, K. V. (2006). Estudio de la germinación y la conservación de semillas de cedro maría (*Calophyllum brasiliense*). Tecnología en Marcha., 19(1), 61-71.
- Liu, G. L. (2011). Making Fischer-Tropsch Fuels and Electricity from Coal and Biomass: Performance and Cost Analysis. Energy and Fuels, 25, 415-437.
- Liu, X. H. (2012). Effect of biochar on soil aggregates in the Loess Plateau: Results from incubation experiments. International Journal of Agriculture and Biology, 14(6), 975-979.
- Luque R, C. J. (2011). Handbook of biofuels production Woodhead . Filadelfia, Pensilvania: Publishing Limited.
- Mariani, S. (2000). Química de la madera: conceptos básicos y reacciones. Publicación docente UACH, 50, 50-62.
- Marinova, S. (2009). The effects of heavy metals on seed germination and plant growth on alfalfa plant (*Medicago sativa*). Bulgarian Journal of Agricultural Science, 15(4), 347–350.
- Martínez G, Í. G.-C. (2013). Tiempos de apilado del bagazo del maguey mezcalero y su efecto en las propiedades del compost para sustrato de tomate. Revista Internacional de Contaminación, 29(3), 209-216.
- Masera, O. (2006). Bioenergy Use Patterns in Mexico. The International Seminar on Bioenergy and sustainable Rural Development (págs. 1-34). Morelia: Centro de investigaciones sobre ecosistemas, UNAM.
- Maxwell K, J. G. (2000). Chlorophyll fluorescence – a practical guide. Journal of Experimental Botany, 51(345), 659–668.
- Mittelbach, M. (2015). Fuels from oils and fats: Recent developments and perspectives. European Journal Lipid Science and Technology, 117(11), 1832–1846.
- Mohan, D. P. (2006). Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: A critical review. Energy and Fuels, 20, 848–889.
- Nanda S, D. A. (2015). Nanda S, Dalai A, Berruti F, Kozinski J, (2015). Biochar as an Exceptional Bioresource for Energy, Agronomy, Carbon Sequestration, Activated Carbon and Specialty Materials, Waste Biomass Valor. Waste and Biomass Valorization volume, 7, 201-235.
- Navarro R, M.-R. R. (2004). Fluorescencia de la clorofila en cinco procedencias de "Pinus halepensis" Mill y su respuesta a estrés hídrico. Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales, 17, 69-74.
- Norma Oficial Mexicana NOM-070-SCFI-2016, N. O. (2016). Bebidas alcohólicas-Mezcal-Especificaciones. Mexico: Diario Oficial de la Federación.
- Norma Oficial Mexicana, N.-0.-R.-2. (2000). Especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. México: Diario Oficial de la Federación.
- Northup, J. (2013). Biochar as a replacement for perlite in greenhouse soilless substrates . Iowa: Iowa State University.
- Novak, J. M. (2009). Characterization of Designer Biochar Produced at Different Temperatures and Their Effects on a Loamy Sand. Annals of Environmental Science, 3(2009), 11-19.
- Pastor-Villegas, J. P.-V. (2006). Study of commercial wood charcoals for the preparation of carbón. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 76(1-2), 103-108.
- Petter, F. A. (2012). Biochar conditioner as substrate for the production of lettuce. Revista Agrarian, 5(17), 243-250.
- Porta C., J. M.–A. (2014). Edafología: Uso y protección de suelos. 3a edición. Madrid, España: Mundi-Prensa.
- Prado-Martínez M, A.-H. J.-A.-J. (2012). Caracterización de hojas de mazorca de maíz y de bagazo de caña para la elaboración de una pulpa celulósica mixta, Madera y Bosques. Madera y bosques, 18(3), 37-51.

- Quintero, C. F. (2012). Evaluation of alternative substrates for growing the mini carnation (*Dianthus caryophyllus* L.). *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 6(1), 76-87.
- Ramos, P. (2017). *Biorrefinerías Basadas en Explotaciones agropecuarias y Forestales*. Palencia, España: Departamento de Ciencias Agrarias y del Medio Natural Instituto Universitario de Investigación en Ciencias Ambientales de Aragón.
- REMBIO. (2011). *Estado del arte de la bioenergía en México*. México: REMBIO.
- Richter F, F. T. (2010). Utilization of semi-natural grassland through integrated generation of solid fuel and biogas from biomass. *Grass and Forage Science*, 64(4), 185–199
- Rivera R, M. C. (2013). Evaluación de residuos agrícolas como sustrato para la producción de *Pleurotus ostreatus*. *Luna Azul, Universidad de Caldas*, 37, 89-100.
- Routray K, B. J. (2017). Hydrodeoxygenation of Pyrolysis Oils. *Energy Technology*, 5(1), 80 – 93.
- Rowell, R. M. (2012). *Handbook of wood chemistry and wood composites*. Florida, USA: Boca Ratón.
- Rutherford, D., Wershaw, R., & Cox, L. (2004). Changes in Composition and Porosity Occurring During the Thermal Degradation of Wood and Wood Components. *Scientific Investigations Report*, 8, 2004-5292.
- SAGARPA. (2017). *Plan Agrícola Nacional*. Obtenido de Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/257066/Potencial-Agave\\_Tequilero\\_y\\_Mezcalero.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/257066/Potencial-Agave_Tequilero_y_Mezcalero.pdf).
- SAGARPA, S. d. (2013). SAGARPA. Obtenido de SAGARPA: [http://2006-2012.sagarpa.gob.mx/agricultura/Paginas/Agricultura Protegida2012.aspx](http://2006-2012.sagarpa.gob.mx/agricultura/Paginas/Agricultura%20Protegida2012.aspx).
- SAGARPA, S. d. (2017). SAGARPA. Obtenido de Planeación agrícola nacional, jitomate mexicano.: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/255627/Planeaci\\_n\\_Agr cola\\_Nacional\\_2017-2030\\_-\\_parte\\_uno.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/255627/Planeaci_n_Agr cola_Nacional_2017-2030_-_parte_uno.pdf)
- Sanchez-Monedero M.A, C. M. (2018). Role of biochar as an additive in organic waste composting. *Bioresource Technology*, 247, 1155–1164.
- Saucedo-Luna J, C.-M. A. (2011). Efficient chemical and enzymatic saccharification of the lignocellulosic residue from Agave tequilana bagasse to produce ethanol by *Pichia caribbica*. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, 38(6), 725–732.
- Secretaria de Economía, S. d. (2015). Secretaria de Economía. Obtenido de Denominación de Origen: <https://www.gob.mx/se/articulos/mexico-cuenta-con-16-denominaciones-de-origen?idiom=es>.
- SENER. (2012). *Atlas Nacional de Biomasa de la Secretaria de energía, ANBIO*. Obtenido de Atlas Nacional de Biomasa de la Secretaria de energía, ANBIO: <https://www.gob.mx/sener/articulos/atlas-nacional-de-biomasa>
- SENER-BID-GTZ. (2016). *Sistema de Información Energética*. Obtenido de Sistema de Información Energética.: <http://sie.energia.gob.mx/>
- Song, X. D. (2014). Chemosphere Application of biochar from sewage sludge to plant cultivation : Influence of pyrolysis temperature and biochar-to-soil ratio on yield and heavy metal accumulation. *Chemosphere*, 109, 213-220.
- Suarez, D. (2019). Evaluación de la adsorción del carbón obtenido del mesocarpio de cacao (*theobroma cacao* l.) modificado por ultrasonido. *Sociedad de Química*, 85(2), 216-230
- Tan G, S. W. (2016). Sorption of mercury (II) and atrazine by biochar, modified biochars and biochar based activated carbon in aqueous solution. *Bioresour Technology*, 211, 727–735.
- Thyrel, M. R. (2013). Critical ash elements in biorefinery feedstock determined by X-ray spectroscopy. *Applied Energy*, 102, 1288-1294.
- Tian, Y. S. (2012). Biochar made from green waste as peat substitute in growth media for *Calathea rotundifolia* cv. *Fasciata*. *Scientia Horticulturae*, 143, 15-18.

- Tomas, A. (2015). Utilización De Medidas De Fluorescencia De La Clorofila Para Monitorizar El Estado Nutricional Y Estimar El Potencial Enológico En Viñedos Afectados Por Clorosis Férrica, Tesis doctoral. Valladolid: Universidad de Valladolid, Escuela Técnica Superior.
- Ullua A, G. E. (2010). Cuaderno de Trabajo: Elaboración de Pinole. Obtenido de Cuaderno de Trabajo: Elaboración de Pinole: <https://www.cultura.gob.mx/turismocultural/cuadernos/pdf/cuaderno15.pdf>
- Ungureanu G, S. S. (2015). Arsenic and antimony in water and wastewater: overview of removal techniques with special reference to latest advances in adsorption. *Journal of Environmental Management*, 151, 326–342.
- Urien A, L. F. (2013). Obtención de biocarbones y biocombustibles mediante pirólisis de biomasa residual. Madrid, España: Departamento de Ciencias Analíticas.
- Varela S, A. V. (2011). Latencia y germinación de semillas. Tratamientos. Serie técnica: Sistemas Forestales Integrados Área Forestal, 3, 1-10.
- Vassilev S, B. D. (2010). An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel*, 89, 913–933.
- Vaughn, S. F. (2013). Comparison of biochars derived from wood pellets and pelletized wheat straw as replacements for peat in potting substrates . *Peer Reviewed Journal* , 51, 437-443.
- Vaughn, S. F. (2015). Physical and chemical characterization of biochars produced from coppiced wood of thirteen tree species for use in horticultural substrates. *Industrial Crops and Products*, 66, 44-51.
- Vega A, F. H. (2012). Análisis de cenizas y minerales de hongos comestibles *Pleurotus* spp., cultivados sobre paja de arroz (*Oryza sativa*), tuza y rastrojo de maíz. *RIDTEC*, 8(2), 15-23.
- Villar, R. (2018). Changes in root traits explain the variability of biochar effects on fruit production in eight agronomic species. *Organic Agriculture*, 9(2), 1-16.
- Wang, M. Z. (2018). Review on utilization of biochar for metal-contaminated soil. *Journal of Environmental Sciences*, 63, 156-173.
- Warren, C. (2012). "The Effects of Biochar Amendment to Soil on Bioenergy Crop Yield and Biomass Composition. " Master's. Tennessee: University of Tennessee.
- Weber, K. Q. (2018). Properties of biochar. *Fuel*, 217, 240-261.
- Wilches Rojas, F. Á. (2008). Tamaños de alvéolo y diferentes láminas de riego en obtención de plantulas de tomate. *Revista U.D.C.A Actualidad and Divulgación Científica*, 11(2), 141-151.
- Wise, L. M. (1946). Chlorite holocellulose, its fractionation and bearing on summative wood analysis and studies on the hemicelluloses. *Paper Trade Journal*, 122(2), 35-43.
- Xiaoli L, S. Z. (2007). Metal sorption on soils as affected by the dissolved organic matter in sewage sludge and the relative calculation of sewage sludge application. *Journal of Hazardous Materials*, 149, 399-407.
- Xiong X, I. K. (2017). A review of biochar-based catalysts for chemical synthesis, biofuel. *Bioresource Technology*, 246, 254–270.
- Xu F, Y. J. (2013). Qualitative and quantitative analysis of lignocellulosic biomass using infrared techniques: a mini-review. *Applied Energy*, 104, 801–809.
- Yang Yang, S. M. (2015). A Field Experiment on Enhancement of Crop Yield by Rice Straw and Corn Stalk-Derived Biochar in Northern China. *Sustainability*, 7(10), 13713-13725.
- Yokoyama Y, T. K. (2012). Differences in the immobilization of arsenite and arsenate by calcite. *Geochimica et Cosmochimica*, 91, 202-219.
- You. S, S. O. (2017). A critical review on sustainable biochar system through gasification: Energy and environmental applications. *Bioresource Technology*, 246, 242–253.
- Zarate, M. (2014). Manual de hidroponía. México: Universidad Nacional Autónoma De México.

- Zhang W, Z. J. (2015). Atrazine immobilization on sludge derived biochar and the interactive influence of coexisting Pb(II) or Cr(VI) ions. *Chemosphere*, 134, 438–445.
- Zwieten L. Van, K. S. (2010). Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. *Plant Soil*, 327, 235–246.