



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

## **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 tu 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

<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>9</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS .....</b>	<b>11</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>12</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>14</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>16</b>
<b>2. ESTADO DEL ARTE.....</b>	<b>20</b>
2.1. DEFINICIÓN DE BIOMASA .....	20
2.2. TIPOS DE BIOMASA .....	20
2.2.1. <i>Por composición química</i> .....	20
2.2.2. <i>Por su origen</i> .....	22
2.3. USOS DE LA BIOMASA .....	24
2.4. DILEMA DE USO DE BIOMASA PARA CONSUMO Ó PARA USO INDUSTRIAL .....	27
2.5. TIPOS DE BIOMASA PARA USO INDUSTRIAL O COMERCIAL .....	27
2.6. DISPONIBILIDAD DE BIOMASA EN MÉXICO PARA FINES INDUSTRIALES.....	29
2.7. AGROINDUSTRIAS LOCALES CON ALTA DISPONIBILIDAD DE BIOMASA RESIDUAL.....	31
2.7.1. <i>Mezcalera artesanal</i> .....	31
2.8. SOLUCIÓN SUSTENTABLE: BIORREFINERÍA .....	37
2.9. UN ENFOQUE LOCAL: INTEGRACIÓN SECUENCIAL DE ETAPAS SUSTENTABLES .....	41
2.10. POTENCIAL DE APLICACIÓN DE LOS PRODUCTOS SOLIDOS DE LA VALORIZACIÓN DE LA BIOMASA RESIDUAL. ....	42
2.11. PIRÓLISIS DE BLR.....	43
2.12. APLICACIONES TÍPICAS DEL BIOCHAR .....	48
2.13. APLICACIONES AGRONÓMICAS .....	49
<b>3. ÁREA DE OPORTUNIDAD.....</b>	<b>53</b>
<b>4. JUSTIFICACIÓN .....</b>	<b>57</b>
<b>5. HIPÓTESIS .....</b>	<b>59</b>
<b>6. OBJETIVO .....</b>	<b>60</b>
6.1. OBJETIVO GENERAL .....	60
6.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	60
<b>7. METODOLOGÍA .....</b>	<b>61</b>
7.1. MATERIA PRIMA: BAGAZO HÚMEDO.....	62
7.2. PRE-TRATAMIENTO.....	62
7.3. PIRÓLISIS LENTA DE BIOCHAR .....	63
7.3.1. <i>Diseño y puesta en marcha del pirolizador</i> .....	63
7.3.2. <i>Diseño del pirolizador</i> .....	64

7.3.3.	<i>Implementación del sistema de reacción</i> .....	68
7.4.	ANÁLISIS FÍSICO .....	69
7.4.1.	<i>Humedad</i> .....	69
7.4.2.	<i>Tamaño de partícula</i> .....	70
7.4.3.	<i>Densidad aparente</i> .....	71
7.4.4.	<i>Conductividad</i> .....	72
7.5.	ANÁLISIS QUÍMICO DE BIOMASA.....	73
7.5.1.	<i>Caracterización de composición química</i> .....	73
7.5.2.	<i>Extraíbles</i> .....	74
7.5.3.	<i>Lignina insoluble en ácido</i> .....	75
7.5.4.	<i>Holocelulosa</i> .....	76
7.5.5.	<i>Celulosa</i> .....	77
7.5.6.	<i>Hemicelulosa</i> .....	78
7.5.7.	<i>Cenizas y materia orgánica</i> .....	79
7.5.8.	<i>Balance de masa del análisis de composición química</i> .....	80
7.6.	ANÁLISIS TERMOQUÍMICO .....	80
7.7.	ANÁLISIS DEL CONTENIDO METÁLICO.....	81
7.8.	MEDICIÓN DEL PH DE LA SUPERFICIE .....	82
7.9.	PRUEBAS FUNCIONALES .....	83
<b>8.</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>90</b>
8.1.	PRE-TRATAMIENTO DE LA MUESTRA .....	90
8.2.	PIRÓLISIS DEL BAGAZO SECO.....	92
8.2.1.	<i>Construcción del reactor</i> .....	92
8.2.2.	<i>Condiciones de operación</i> .....	93
8.2.3.	<i>Calibración de periféricos</i> .....	95
8.2.4.	<i>Medidas de seguridad</i> .....	97
8.2.5.	<i>Operación del reactor</i> .....	97
8.2.6.	<i>Resultados representativos</i> .....	101
8.3.	ANÁLISIS FÍSICO .....	103
8.3.1.	<i>Determinación de humedad</i> .....	103
8.3.2.	<i>Densidad</i> .....	104
8.3.3.	<i>Tamaño de partícula</i> .....	105
8.3.4.	<i>pH</i> .....	106
8.3.5.	<i>Conductividad</i> .....	107
8.4.	ANÁLISIS QUÍMICO DE LOS SÓLIDOS .....	109
8.4.1.	<i>Extraíbles</i> .....	109
8.4.2.	<i>Lignina insoluble en ácido</i> .....	110
8.4.3.	<i>Celulosa</i> .....	110
8.4.4.	<i>Hemicelulosa</i> .....	111
8.4.5.	<i>Cenizas y materia orgánica</i> .....	111
8.4.6.	<i>Resultado de análisis químico de bagazo</i> .....	112

8.5.	ANÁLISIS QUÍMICOS DE BIOCHAR Y SUSTRATOS COMERCIALES .....	114
8.5.1.	<i>Comparación de la composición del biochar en función de la composición de bagazo</i> .....	115
8.5.2.	<i>Análisis del contenido metálico de bagazo, biochar y sustratos comerciales.</i>	116
8.6.	ANÁLISIS POR DESCOMPOSICIÓN POR TEMPERATURA PROGRAMADA .....	120
8.7.	PRUEBAS FUNCIONALES .....	122
<b>9.</b>	<b>ANÁLISIS.....</b>	<b>138</b>
9.1.	DIFERENCIA EN EL ANÁLISIS QUÍMICO DEL BAGAZO DE AGAVE, BIOCHAR Y PEAT MOSS.....	138
9.2.	EFFECTO DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA EN EL POTENCIAL AGRONÓMICO DEL PEAT MOSS Y BIOCHAR .....	139
9.2.1.	<i>Cenizas y Metales</i> .....	140
9.2.2.	<i>(Hemicelulosa + Celulosa) vs Lignina</i> .....	140
9.2.3.	<i>Materia Orgánica</i> .....	141
9.3.	EFFECTO DE LAS PROPIEDADES FISICAS EN EL POTENCIAL AGRONÓMICO DEL PEAT MOSS Y BIOCHAR .....	142
9.3.1.	<i>Tamaño de partícula y densidad</i> .....	142
9.3.2.	<i>pH del sistema muestra en solución acuosa</i> .....	143
9.3.3.	<i>Conductividad del sistema muestra en solución acuosa</i> .....	149
9.4.	COMPARACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL PEAT MOSS Y EL BIOCHAR. ....	150
9.4.1.	<i>Pruebas funcionales</i> .....	152
9.4.2.	<i>Mezclas de sustrato viables</i> .....	155
9.5.	ANÁLISIS DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE BIOCHAR.....	157
9.5.1.	<i>Estimación del carbón secuestrado en el proceso</i> .....	160
9.5.2.	<i>Consideraciones económicas preliminares</i> .....	161
9.6.	MEJORAS NECESARIAS EN EL BIOCHAR PARA QUE REEMPLACE ÍNTEGRAMENTE AL PEAT MOSS .....	163
9.7.	<i>¿QUE SE REQUIERE PARA EL DESARROLLO DE UN PAQUETE TECNOLÓGICO?</i> .....	163
9.8.	VALIDACIÓN DE LA HIPÓTESIS DE LA TESIS.....	166
<b>10.</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>167</b>
<b>11.</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>168</b>
<b>12.</b>	<b>ANEXO A: DATOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS DE LA SÍNTESIS POR LOTES DE BIOCHAR .....</b>	<b>176</b>
<b>13.</b>	<b>ANEXO B: DATOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS DE PRUEBAS FUNCIONALES .....</b>	<b>177</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1. Disposición de biomasa en México con fines energéticos.....	30
Figura 2-2. Enfoque de una biorefinería para la valorización de los residuos generados en la industria del mezcal .....	36
Figura 2-3. Biorrefinería de BLR.....	39
Figura 2-4. Productos de la valorización de residuos agroindustriales sólidos .....	43
Figura 3-1. Diagrama de producción de jitomate.....	55
Figura 4-1. Ciclo sustentable optimizado para el uso industrial de biomasa lignocelulósica .	58
Figura 7-1. Estrategia general para la síntesis y caracterización fisicoquímica del biochar, y su aplicación como aditivo agrícola. ....	61
Figura 7-2. Representación esquemática del pirolizador .....	64
Figura 7-3. Sistema de pirólisis .....	67
Figura 7-4. Parámetros morfofisiológicos .....	85
Figura 7-5. Fluorómetro MINI-PAM [Manual and Documentation. Instruction manual for MINI-PAM-II] .....	87
Figura 8-1. Proceso de preparación de la muestra. ....	91
Figura 8-2. Balance de masa para pre-tratamiento de la muestra .....	92
Figura 8-3. Curva de calibración del controlador de temperatura y termopar .....	96
Figura 8-4. a) Curva de calibración de flujo másico, b) flujo volumétrico a la descarga del reactor durante la pirólisis .....	96
Figura 8-5. Sistema de pirólisis en operación.....	98
Figura 8-6. Perfil de temperatura.....	99
Figura 8-7. Monitoreo del flujo de reacción. ....	100
Figura 8-8. Productos de pirólisis .....	101
Figura 8-9. Balance de masa en pirólisis.....	102
Figura 8-10. Análisis de pH para las mezclas biochar-sustrato.....	107
Figura 8-11. Análisis de conductividad para las mezclas biochar-sustrato .....	108
Figura 8-12. Termograma de bagazo de Agave Salmiana, biochar y Peat Moss. ....	121
Figura 8-13. Monitoreo fotográfico de la plántula. ....	124
Figura 8-14. Altura de plántula. a) Datos. b) Análisis por tratamiento .....	125
Figura 8-15. Diámetro de tallo. a) Datos. b) Análisis por tratamiento .....	126
Figura 8-16. Longitud de hojas verdaderas. a) Datos. b) Análisis por tratamiento.....	127
Figura 8-17. Longitud de raíz. a) Datos. b) Análisis por tratamiento .....	128
Figura 8-18. Peso fresco. a) Datos. b) Análisis por tratamiento .....	129
Figura 8-19. Peso seco. a) Datos. b) Análisis por tratamiento .....	130
Figura 8-20. Biomasa. a) Datos. b) Análisis por tratamiento .....	130
Figura 8-21. Representación gráfica para análisis inicial de los resultados de Y(II). ....	132
Figura 8-22. Hojas de plántulas de la formulación S100 a los 45 días.....	134
Figura 8-23. Diferencia de crecimiento de raíz en formulaciones S100 y S75 a 45 días .....	134
Figura 8-24. Resultados del análisis de ANOVA, determinación fluorescencia de clorofila. ....	135
Figura 9-1. Análisis de pH para las mezclas biochar-sustrato.....	149
Figura 9-2. Análisis de conductividad para las mezclas biochar-Peat Moss. ....	150

Figura 9-3. Esquema de resumen de propiedades físicas y químicas .....	152
Figura 9-4. Comparación del crecimiento de la plántula para el caso de estudio con la referencia (Hesham <i>et al.</i> , 2018).....	154
Figura 9-5. Crecimiento de plántula, caso de estudio Biochar vs Peat Moss.....	155
Figura 9-6. Diagrama de flujo de la producción de biochar .....	159
Figura 9-7. Mecanismo de formación de biochar a partir de celulosa .....	160
Figura 9-8. Diagrama para el paquete tecnológico.....	165

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1. Clasificación de la biomasa según su composición química y su uso como comestible.....	26
Tabla 2-2. Tipos de biomasa usada para la producción de biodiesel.....	28
Tabla 2-3. Tipos de tratamiento térmico de biomasa .....	40
Tabla 2-4. Reactores usados para la pirólisis de biomasa .....	47
Tabla 2-5. Aplicaciones del biochar.....	48
Tabla 2-6. Aplicaciones agronómicas de biochar.....	51
Tabla 7-1 Mezclas de biochar-sustrato.....	89
Tabla 8-1. Contenido de humedad del bagazo residual de la mezcalería.....	90
Tabla 8-2. Resumen características de pirolizador y muestra a tratar .....	94
Tabla 8-3. Reporte de análisis físico .....	103
Tabla 8-4. Análisis de densidad.....	105
Tabla 8-5. Valores de pH para diferentes tipos de biochar .....	107
Tabla 8-6. Resultados del análisis químico del bagazo de Agave Salmiana base seca .....	109
Tabla 8-7. Relación de compuestos estructurales del bagazo .....	113
Tabla 8-8. Reporte de análisis químico para biochar y sustratos comerciales .....	115
Tabla 8-9. Análisis químico de Biochar.....	116
Tabla 8-10. Reporte del contenido metálico presente en el bagazo de agave .....	119
Tabla 8-11. Resultados de Fluorescencia de la clorofila por formulación.....	131
Tabla 9-1. Análisis químico para biomasa, biochar y Peat Moss .....	138
Tabla 9-2. Relación de compuestos estructurales de sustratos .....	140
Tabla 9-3. Reporte de análisis físico para bagazo, biochar y Peat Moss.....	142
Tabla 9-4. Tratamientos para ajuste de pH al biochar .....	147
Tabla 9-5. Comparativa de resultados Peat Moss y Biochar .....	151
Tabla 9-6. Principales resultados de pruebas funcionales .....	152
Tabla 9-7. Costos de biochar y Peat Moss .....	162

## 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>Grasas residuales</b>  <b>Caso especial:</b> Microalgas	<b>Biodiesel</b> A nivel piloto bioturbosina (queroseno renovable).
			<b>No comestibles:</b> Jatropha, higuera		
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).

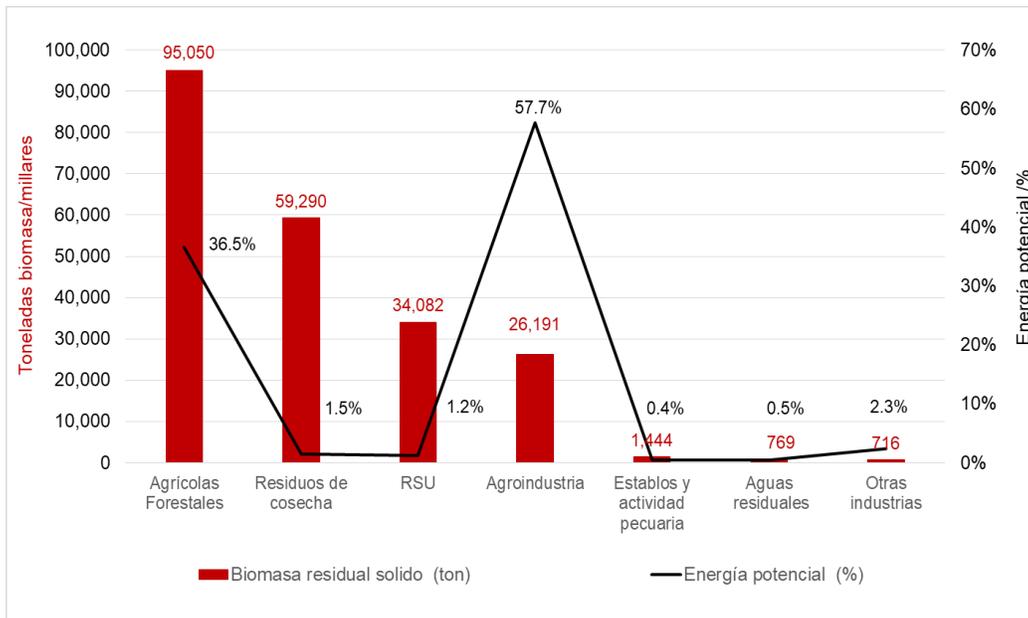


Figura 2-1. Disposición de biomasa en México con fines energéticos.

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 (Ulluo *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 tiene 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.

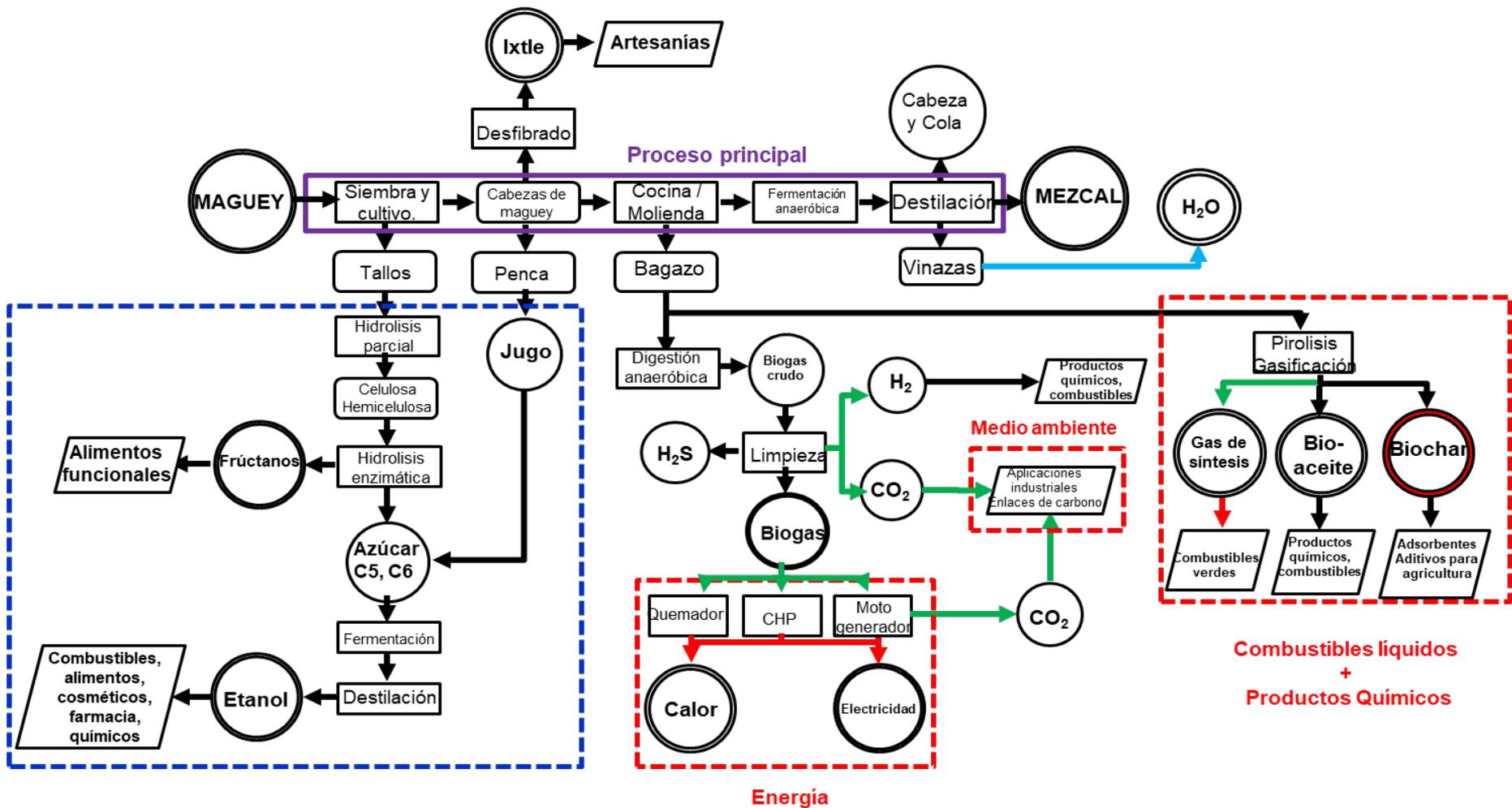


Figura 2-2. Enfoque de una biorefinería para la valorización de los residuos generados en la industria del mezcal

## 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.

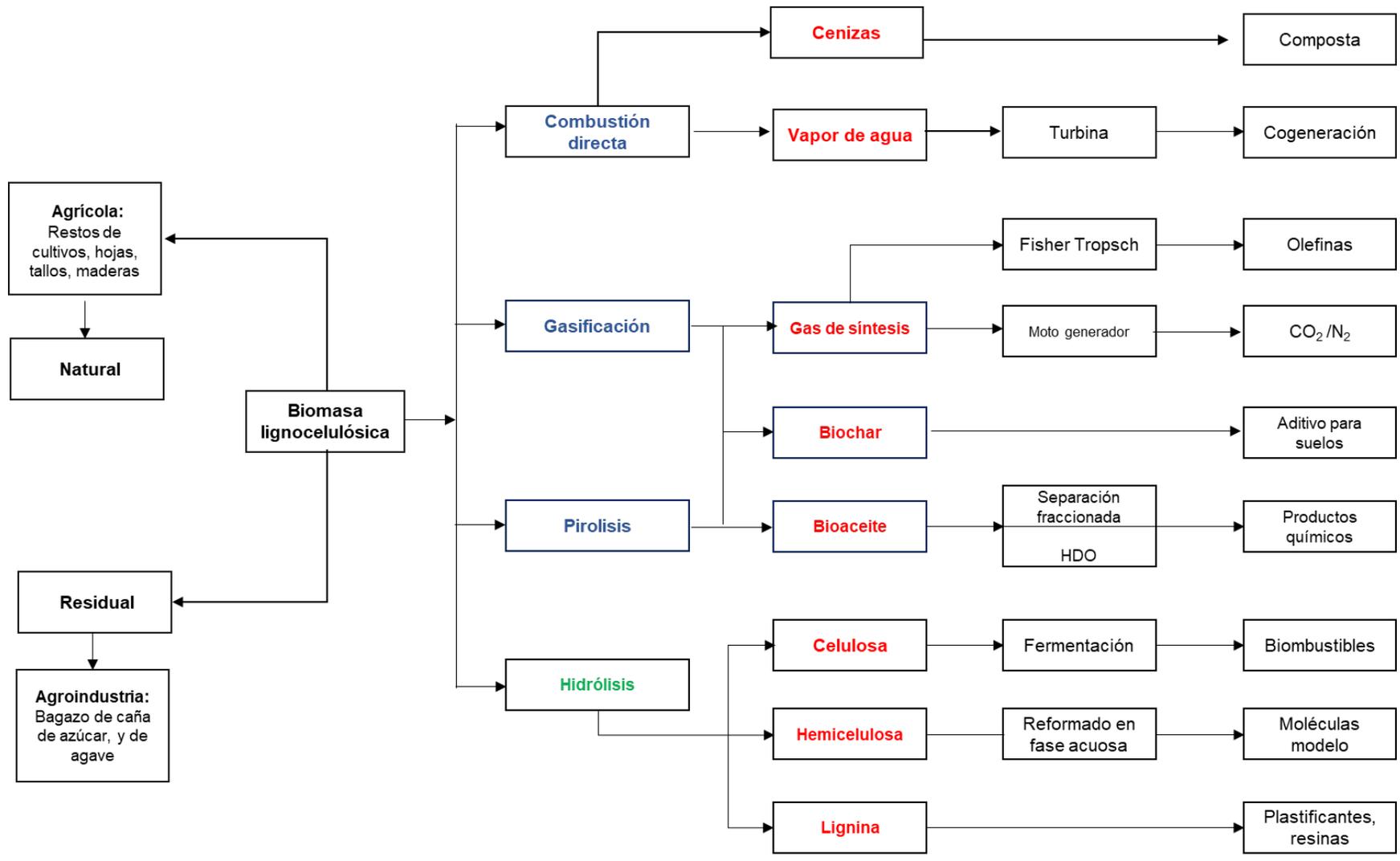


Figura 2-3. Biorrefinería de BLR

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.

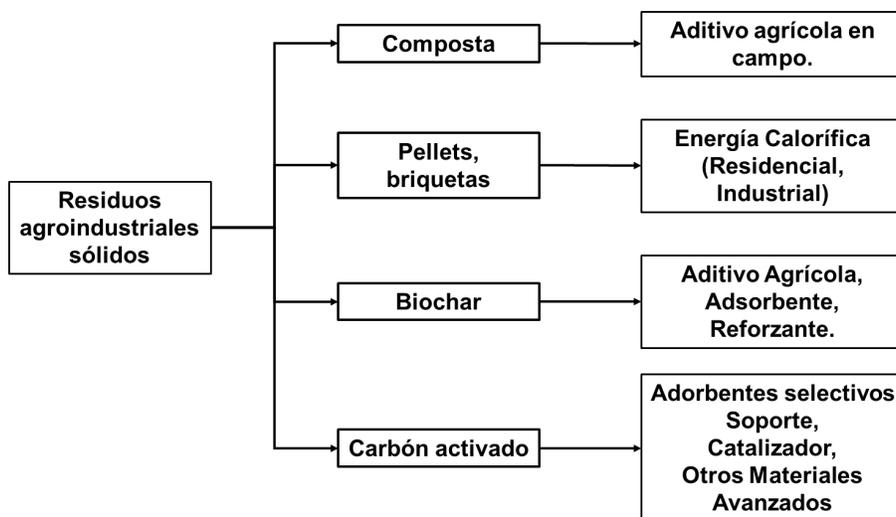


Figura 2-4. Productos de la valorización de residuos agroindustriales sólidos

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).

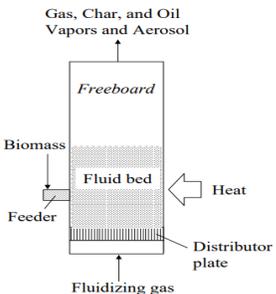
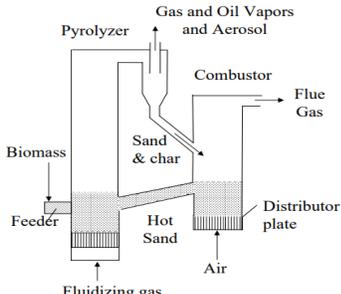
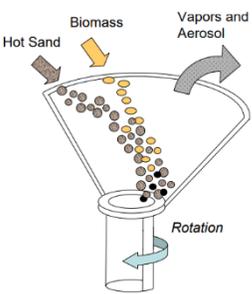
Es pertinente indicar que el tipo de materia prima utilizada también condiciona las propiedades finales del biochar. Por ejemplo, la biomasa residual que contiene metales como sodio, potasio y calcio, pueden aumentar los rendimientos de obtención del biochar, debido a que los metales presentes en la 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

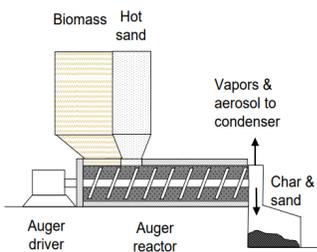
forestales) maximizan los rendimientos de producción del biochar, debido a que la lignina tiene mayor resistencia a la descomposición térmica (280-500 C) en comparación a la celulosa (240-350 C) y hemicelulosa (200-260 C).

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.

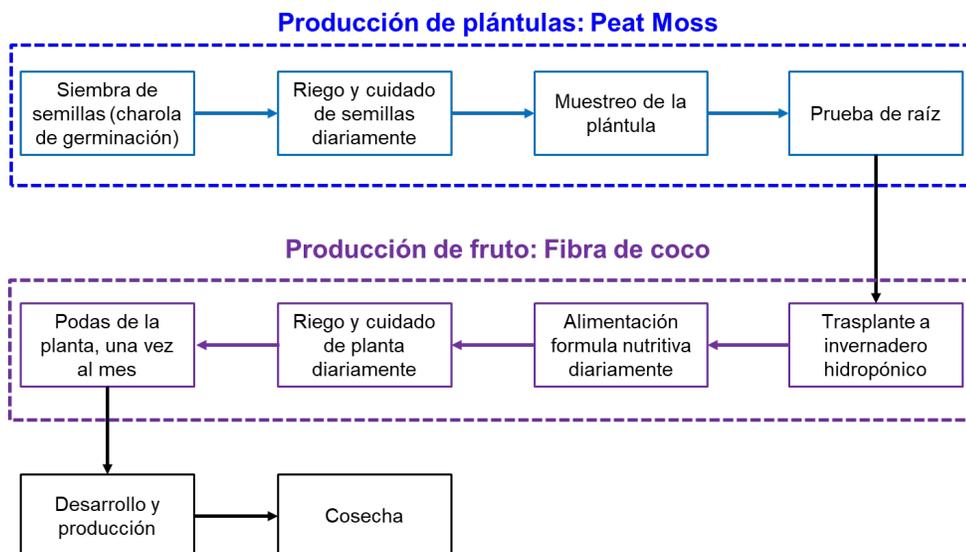


Figura 3-1. Diagrama de producción de jitomate

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, le 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.

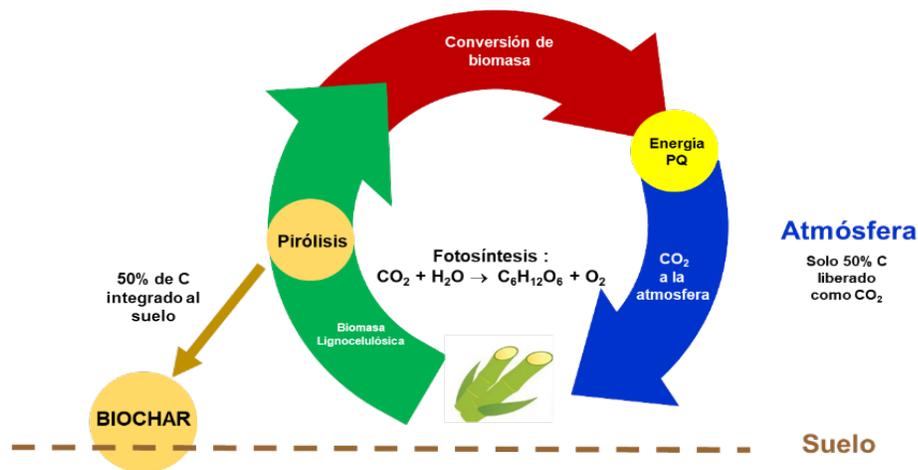


Figura 4-1. Ciclo sustentable optimizado para el uso industrial de biomasa lignocelulósica

## 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

En este capítulo se describe la estrategia experimental ejecutada en este trabajo, la cual se esquematiza en la Figura 7-1.

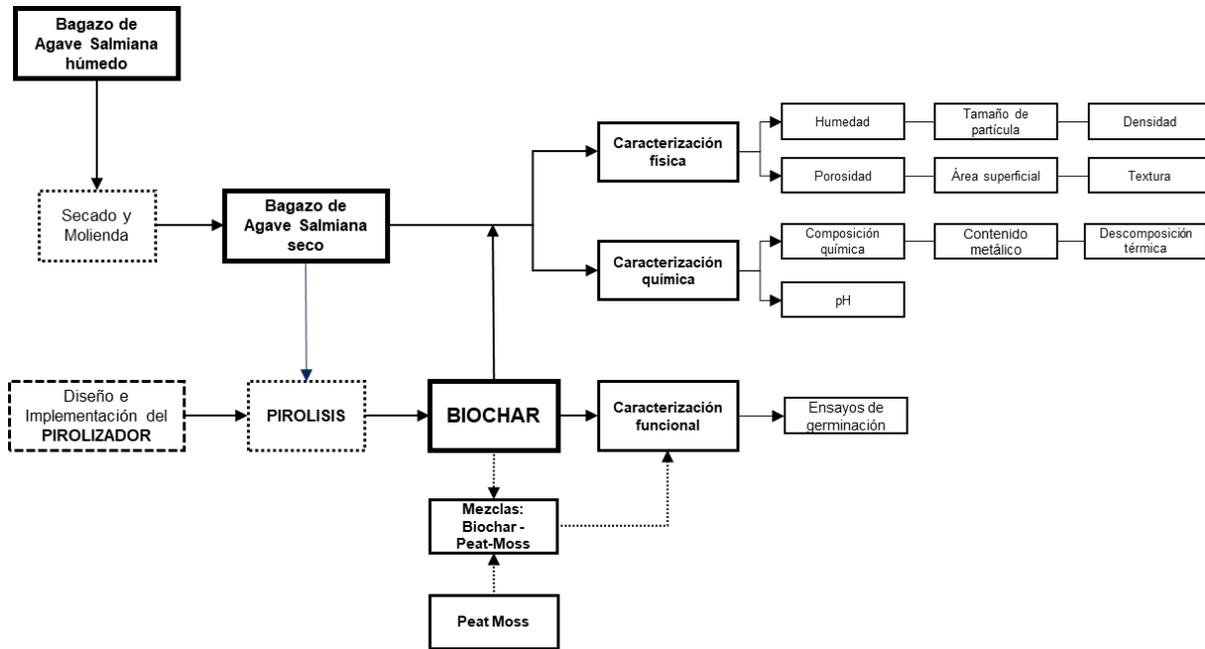


Figura 7-1. Estrategia general para la síntesis y caracterización fisicoquímica del biochar, y su aplicación como aditivo agrícola.

Este capítulo se describe, en primer término, la selección de materia prima, la cual se colectó como bagazo húmedo. A continuación, se refiere el pre-tratamiento de la materia prima, incluyendo las etapas de secado y molienda (o triturado), para generar el bagazo seco. La siguiente sección se detalla el proceso de pirólisis lenta, incluyendo las etapas de diseño e implementación del pirolizador y, subsecuentemente, las condiciones usadas durante la pirólisis del bagazo seco para producir el biochar. Posteriormente, se refieren las diferentes técnicas usadas para la caracterización de cada uno de los materiales. Para el caso del bagazo seco y del biochar se usaron técnicas físicas y químicas. En relación a las físicas, se describen las técnicas de humedad, tamaño de partícula y densidad. Por otra parte, se detalla la composición química de las muestras mediante normas estandarizadas TAPPI, ASTM y NREL y también mediante una técnica de descomposición térmica; se incluye también el contenido metálico, que se evaluó usando técnicas de plasma de acoplamiento inductivo (ICP por sus siglas en inglés); también se incluye la medición del pH de la superficie de las muestras. De forma

complementaria, se evaluó el potencial del biochar y del Peat Moss, que es un sustrato comercial usado como referencia, en pruebas funcionales. Para este propósito, se describen las pruebas funcionales realizadas durante el crecimiento de plántulas de jitomate en un invernadero; se hace notar que estas pruebas también se realizaron para una serie de mezclas de biochar - Peat Moss.

### **7.1. Materia prima: bagazo húmedo**

La materia prima usada para el desarrollo del proyecto fue una muestra húmeda de 100 Kg de bagazo húmedo de *Agave Salmiana*, donada por la empresa Laguna Seca, productora de mezcal artesanal en Charcas, S. L. P. Se hace notar que el bagazo resultó del tratamiento de extracción del jugo de la penca de agave cocida y tiene una elevada humedad. El bagazo se recolectó de depósito al aire libre que tiene la empresa.

### **7.2. Pre-tratamiento**

A la recepción del bagazo en el laboratorio, la muestra se separó en cuatro lotes y, cada uno de ellos, en forma secuencial, se sometió a un pre-tratamiento que consistió de las siguientes etapas.

#### **a) Secado**

La muestra se sometió a dos etapas de secado para evitar alteraciones en su composición o el degradado biológico de la muestra:

- i) Secado por exposición al sol, durante 48 h.
- ii) Secado en horno de convección a 70 C por 24 h.

Para cada una de los lotes, se tomó una muestra después de cada secado, para medir por duplicado el contenido de humedad resultante, de acuerdo al proceso descrito en la sección 7.4.1.

#### **b) Molienda**

La molienda del bagazo seco se realizó en el Instituto de Investigación en Zonas Desérticas (IIZD) de la UASLP con un molino Chipeadora Echo Bear Cat SC2206.

#### **c) Tamizado**

La muestra se tamizó en un equipo Ro-Tap durante 5 min, usando dos tamices, uno de malla número 40 (0.420 mm) y otro de malla número 60 (0.25 mm). La muestra

retenida en la malla número 60 se utilizó para la caracterización química. Previo a su empleo, la muestra se guardó en recipientes de plástico.

### **7.3. Pirólisis lenta de biochar**

Las etapas para implementar el sistema experimental de pirólisis lenta en el laboratorio fue el siguiente.

- a) Diseño del pirolizador.
- b) Integración y puesta en marcha del sistema.
- c) Selección de las condiciones y parámetros de operación: temperatura, velocidad de calentamiento, y atmósfera.
- d) Pirólisis del bagazo de *Agave Salmiana*.

#### **7.3.1. Diseño y puesta en marcha del pirolizador**

En esta etapa no hubo una simulación para el diseño del reactor con base a parámetros de ingeniería de reactores químicos, porque no se conocían diferentes propiedades químicas y físicas de la biomasa, ni un estimado confiable de la ley de velocidad para el tipo y nivel de operación a implementar. Por esta razón, se usó información reportada en la literatura y se complementó con la experiencia del grupo de trabajo en la construcción y operación de reactores químicos. De esta forma se identificaron y definieron las variables que determinan un mayor rendimiento de la fase sólida durante la pirólisis de biomasa. La información obtenida en este proyecto se usará para el diseño formal de la siguiente versión del reactor.

Entre las diferentes opciones de pirolizadores para producir biochar, existen diversas alternativas de reactores de lote y de semi-lote. Sin embargo, en este proyecto se propuso diseñar e implementar un pirolizador a nivel laboratorio de semi-lote, por los siguientes propósitos:

- Tener un pirolizador adaptable a un sistema de alimentación de gases y de análisis de productos en línea disponible en el laboratorio.
- Contar con un reactor versátil, cuya carga pueda ser ajustada para el tratamiento térmico de distintos tipos de biomasa.
- Disponer de un pirolizador sencillo y de bajo costo.

- Facilitar la progresiva instrumentación y el escalamiento del reactor.
- Capacitar al estudiante en los principios básicos de construcción y operación de reactores químicos.

### 7.3.2. Diseño del pirolizador

El sistema de tratamiento desarrollado se esquematiza en la figura 7-2.

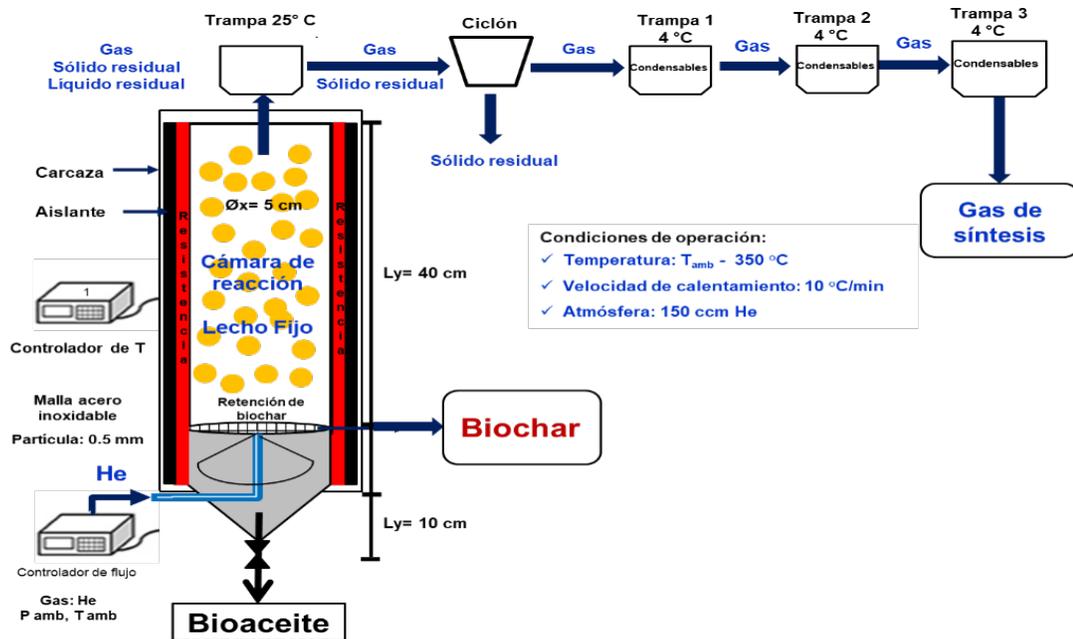


Figura 7-2. Representación esquemática del pirolizador

El sistema de tratamiento incluye 3 módulos principales:

- Alimentación del gas inerte.
- Reacción.
- Condensación de productos líquidos y análisis de productos gaseosos.

En referencia a la selección de los materiales adecuados para la construcción del reactor, se consideró la naturaleza y las condiciones del tratamiento térmico. De esta forma, se puso especial atención a factores tales como la corrosión del material y el posible efecto de la temperatura y las caídas de presión en la tubería. Con base en lo anterior, se decidió construir el reactor utilizando válvulas, uniones, conectores, reductores, codos y tubería de acero inoxidable 316. Las características principales de este material son: mínima o nula corrosión con los gases utilizados, resistencia a alta temperatura y solidez a la ruptura o deformación por esfuerzo provocado por la presión.

El sistema de tratamiento se construyó con piezas de la marca Swagelok, que son fácilmente montables y desmontables, garantizando la flexibilidad del sistema para modificarlo o adaptarle otros equipos. Toda la tubería y los conectores utilizados son de 1/8", a excepción de algunos conectores-reductores de 1/4 " a 1/8" para los accesorios del sistema de alimentación.

El módulo de alimentación (zona A) incluye los controladores, medidores, y accesorios requeridos para hacer fluir un gas puro o una mezcla de gases de composición definida. En este caso, la atmósfera durante la pirólisis debe ser inerte y las opciones contempladas fueron N<sub>2</sub> y He. Si bien el primero es más económico, el sistema de análisis de gases no condensables a la descarga estaba habilitado con He. Por esta razón, para evitar posibles interferencias en los análisis se decidió utilizar He 5.0 ultra alta pureza. Para tener condiciones de operación más estables, el flujo de He que se alimentó al sistema de reacción se controló mediante el uso de controladores de flujo másico MKS, modelo M100B, conectado a una fuente de poder MKS Modelo 247D. El rango típico del flujo de operación se mantuvo de 100 a 200 cm<sup>3</sup>/min.

El módulo de reacción (zona B) consiste del pirolizador, el horno de calentamiento y el dispositivo de control de temperatura del horno. El lazo de control implementado está integrado por un controlador de temperatura, el horno equipado con una resistencia eléctrica que provee la energía al sistema y por un termopar tipo K que mide la temperatura de la parte central del pirolizador, justo a la mitad de la altura del pirolizador, mediante un termopozo. La señal del termopar se compara con la señal previamente establecida en el controlador de temperatura automático y programable (marca Love Controls) y como resultado, el controlador emite una señal eléctrica que permite, mediante el uso de un autotransformador de corriente variable (Variac, marca Napee modelo 140/GV de 10 Amp. y 60 Hz, con una entrada de 120 VCA), suministrar o cortar la corriente eléctrica a la resistencia del horno. Es importante mencionar que el uso del Variac no es obligado para operar el dispositivo de control de temperatura; sin embargo, contribuye a evitar disparos de temperatura en el reactor en caso de malfuncionamiento de un dispositivo del sistema. El horno es un tubo de acero al carbón con un diámetro externo de 3 1/2" y 10" de altura. La energía se suministra a través de una resistencia eléctrica de 3500 W – 125 V, con terminales de cable con seguilla estándar y cubierta

con lámina de acero inoxidable. La temperatura en el horno será proporcional al voltaje aplicado en la resistencia. Para evitar la disipación de energía, el horno tiene un aislamiento térmico de fibra cerámica y está envuelto por una tela protectora. A partir de la información documentada en el capítulo 2.11 y tomando como criterio el usar una temperatura de tratamiento térmico moderada para que tenga una demandad energética elevada, se propuso realizar la pirólisis a 350 C, y usar una velocidad de calentamiento de 10 C/min. Durante la reacción es importante mantener la temperatura del pirolizador en un rango de +/- 10 C con respecto al set point y evitar un disparo al alcanzar la temperatura de operación.

El pirolizador es de diseño propio y se esquematiza en la Figura 7-2. La cámara donde ocurre el tratamiento térmico es de forma tubular, con un diámetro interno de 4 cm y longitud de 30 cm, para que fuera susceptible de adaptarlo al horno eléctrico disponible en el laboratorio. De esta forma, la relación H/D fue 7.5, y el volumen disponible para la carga de biomasa fue 0.378 L. El pirolizador se construyó de acero inoxidable 316, que está diseñado para resistir temperaturas hasta 870 C. La carga de biomasa, típicamente de 40-50 g, se hace por el cabezal superior del pirolizador; la biomasa queda cargada entre dos rejillas, una en la parte inferior y otra en la parte superior, que evitan el arrastre de la misma durante la reacción. Este parámetro es importante para guiar después el escalamiento de la operación. El gas inerte fluye al reactor entrando por la parte inferior que es cónica. Se hace notar que el gas entra a través de un conducto a 45° que se extiende hasta la altura de la rejilla inferior. El gas recorre el reactor y sale por la parte superior, de donde pasa a la sección de condensación y análisis. Se operó a presión atmosférica, que corresponde a 0.8 atm, y se usó un flujo volumétrico de gas inerte de 100 cm<sup>3</sup>/min. Para evitar fugas, en cada cabezal se inserta una película plástica. La relación de peso de muestra a flujo de gas (W/F) fue 0.45 g (cm<sup>3</sup>/min)<sup>-1</sup>. El reactor está equipado con un termopozo donde se inserta el termopar tipo K, el cual queda posicionado en el centro geométrico del reactor; se utilizó un termopar tipo K porque ofrece un rango de medición más amplio que otros termopares (de -200 a +2000 C). Durante la reacción se monitorea continuamente la temperatura y el flujo, La temperatura se evalúa cada minuto y flujo volumétrico se mide experimentalmente cada 5 min con un burbujómetro.

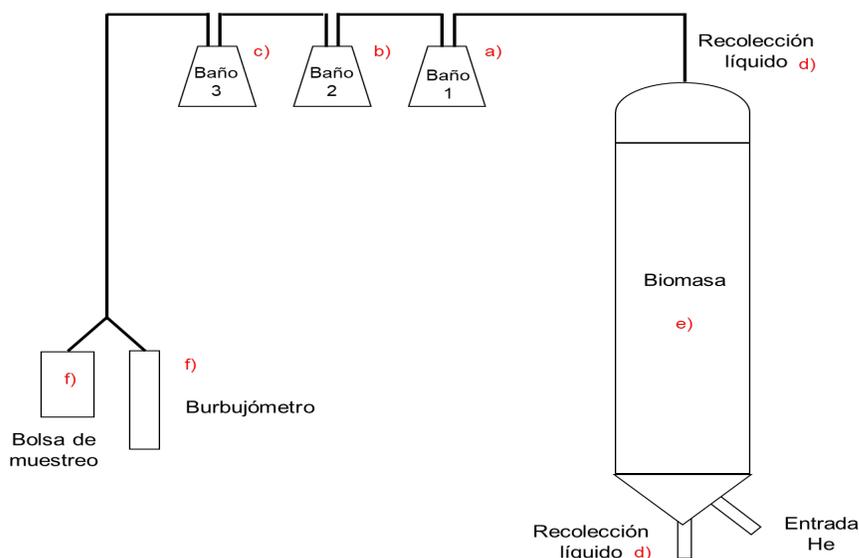


Figura 7-3. Sistema de pirólisis

En la Figura 7-3 se observan los módulos donde se generan las distintas fracciones de muestras producidas en el proceso de pirólisis. El módulo de condensación y análisis de productos (zona C) consiste de trampas de enfriamiento conectadas en serie, seguido de un sistema de cromatografía de gases en línea, que permite la identificación y cuantificación de los gases no condensables a la salida del reactor. En el caso de las trampas de condensación, los dispositivos consisten en tres baños de agua y hielo, mantenidos a 4 C, para la remoción de líquidos condensables y partículas sólidas:

- a) Baño 1: tiene la función de recuperar fracciones sólidas y secuestra la mayor cantidad de condensables, la muestra obtenida se somete a un proceso de evaporación, se recupera un líquido denso de color café y se almacena para su posterior análisis.
- b) Baño 2: segunda etapa de limpieza donde se recupera una mínima cantidad de condensables. De igual manera la muestra se somete a un tratamiento de evaporación para su posterior análisis.
- c) Baño 3: tercera etapa de limpieza, esta muestra no recibe ningún tratamiento, ya que su objetivo es asegurar que ya no se condensen gases, esta trampa a la vista está limpia.

Los gases no condensables que fluyen a la salida del sistema de trampas se pueden analizar en línea mediante un cromatógrafo de gases (GC 6850 Agilent

Technologies) equipado con un detector TCD. Para el análisis se usa una columna HP PLOT Q, y un programa de temperatura de 40 C por 3 min. La temperatura del inyector se encuentra a 180 C y la temperatura del detector en 240 C. De forma alternativa, los gases incondensables se pueden colectar en bolsas tipo “Tedlar” que son fabricadas en el laboratorio, en lotes de 5 min. Posteriormente, se usa el gas colectado para hacer una inyección manual en el cromatógrafo y determinar su composición.

### 7.3.3. Implementación del sistema de reacción

Previo a la operación del pirolizador, se validó la operación de los diferentes dispositivos:

- a) Curva de calibración para el controlador de flujo másico  
Condiciones
- b) Curva de set point y temperatura real del reactor.  
Condiciones
- c) Empaquetamiento de diferentes cargas en el reactor, para validar que no hubiera caídas de presión.

En un experimento preliminar se corrigieron todas las fugas y se hicieron los ajustes al protocolo de operación. Así mismo, se revisaron diferentes escenarios de operación para saber qué acciones tomar en caso de que una de las variables de operación saliera de control, coadyuvando así a la operación segura del reactor.

Durante la operación y al final de cada experimento, se pueden recolectar los siguientes productos de la pirólisis de *Agave Salmiana*.

- a) Gases generados durante la reacción, ya sea analizados en continuo o colectados en bolsas para análisis por lote.
- b) Sólido: biochar producido en la cámara de reacción, recolectado a  $T_{\text{ambiente}}$  al finalizar el experimento.
- c) Trampa de condensación (TC) 1: se colecta la mayor cantidad de condensables; esta muestra se ha sometido a un proceso de evaporación y se recupera un líquido denso de color café.

- d) TC 2: Esta muestra es para asegurar el lavado y el líquido recuperado no recibe ningún tratamiento.
- e) TC3: esa muestra es para asegurar que no hay arrastres de partículas ni de vapores a la sección de análisis; esta muestra no recibe ningún tratamiento.
- f) Líquido recuperado de la cámara de reacción, drenado en el cabezal cónico del reactor. Es un líquido espeso de color café, que se analizará en la siguiente etapa del proyecto.

#### **7.4. Análisis físico**

De acuerdo a lo indicado al inicio del capítulo, la caracterización física de las muestras incluye la medición de:

1. Humedad.
2. Tamaño de partícula.
3. Densidad.
4. Conductividad

##### **7.4.1. Humedad**

El contenido de humedad de una muestra es la relación de la masa de agua contenida por kilogramo de materia seca. La determinación de humedad y de los sólidos totales se basa en la norma **LAP 001**. La prueba se debe realizar inmediatamente después de recolectar la muestra, para que los factores ambientales no afecten ni modifiquen el contenido de humedad presente en la muestra, el resultado obtenido se conoce como contenido de humedad inicial. El método **LAP 001** es también aplicado para determinar el contenido de humedad de las muestras de análisis. El procedimiento detallado es el siguiente.

- a) Determinar el peso constante de la capsula de porcelana, colocando la cápsula en el horno de convección a  $103 \pm 1$  C. durante 24 h.
- b) Pesar en la capsula de porcelana 2 g de muestra.
- c) Colocar la capsula de porcelana en el horno de convección a  $103 \pm 1$  C, durante 24 h.

Se hace notar que en algunas muestras de biomasa el tratamiento térmico favorece la caramelización de azúcares y deterioro de otras moléculas. Cuando se presente esta situación, la determinación se debe realizar en horno de vacío a 60 C, durante 24 h.

- d) Colocar la capsula de porcelana en el desecador por 15 min.
- e) Pesar la capsula de porcelana

El porcentaje de humedad (% H) se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$\%H = \left[ \frac{W_i - W_f}{W_i - W_c} \right] \times 100 \quad 7-1$$

Dónde:

$W_c$ = Peso constante de la capsula de porcelana.  $W_i$ = Peso inicial de la muestra.

$W_f$ = Peso final de la muestra.

Complementariamente, el porcentaje de sólidos totales (% ST) se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$\% ST = 100 - \%H \quad 7-2$$

#### 7.4.2. Tamaño de partícula

El procedimiento para determinar la distribución de tamaño de partícula es el siguiente.

- a) Pesar 50 g de muestra libre de humedad ( $w_1$ )
- b) Tamizar la muestra usando tamices con aberturas entre 2.4 y 0.055 mm en orden decreciente. Las mallas empleadas son: 8, 10, 12, 16, 20, 35, 40, 50, 60 80, 100, 140, 200.

Cuando la agitación se realiza de manera manual, es necesario replicar el movimiento y el tiempo de agitación para cada tamiz.

- c) Registrar el peso de la muestra que es retenida en cada tamiz ( $w_2$ ).
- d) Registrar el peso de la muestra que pasa en cada tamiz ( $w_3$ ).

El cálculo se realiza de la siguiente forma:

$$\text{Retenido parcial (\%)} = \frac{w_2 * 100}{w_3} \quad 7-3$$



Dónde:

w <sub>1</sub>	peso de matraz	w <sub>2</sub>	peso de matraz con muestra
w <sub>3</sub>	peso de matraz con muestra y agua	w <sub>4</sub>	peso de matraz con agua
p <sub>w</sub>	Densidad del agua		

Finalmente, la densidad ( $\rho_w$ ) se calcula por la siguiente ecuación:

$$\rho_w = \frac{p_s}{V_s} \quad 7-6$$

Se hace notar que el valor de la densidad del agua se debe corregir por efecto de temperatura, de acuerdo con la siguiente ecuación aplicable del rango de 16 a 32 C:

$$\rho_{H_2O} = -2.4458 \text{ E-04 (C)} + 1.0030 \quad 7-7$$

#### 7.4.4. Conductividad

La concentración de sales solubles presentes en la solución de una muestra se mide mediante la conductividad eléctrica (CE), que es la medida de la capacidad de un material para conducir la corriente eléctrica. A mayor CE, es más fácil que una corriente eléctrica se mueva a través de la muestra. Esto significa que, a mayor CE, hay una mayor concentración de sales en la muestra. El método consiste en la medición de la CE a partir de una alícuota de la solución (suspensión) que consiste en una relación en peso muestra: agua de 1:2. El procedimiento es el siguiente.

1. Pesar 10 g de muestra en un frasco de vidrio o plástico de boca ancha.
2. Adicionar 20 mL de agua destilada al frasco conteniendo la muestra.
3. Con una varilla de vidrio, agitar manualmente la mezcla de muestra: agua a intervalos de 5 min, y por 30 min.
4. Dejar reposar 15 min.
5. Calibrar el conductímetro LAQUA PC 110 con una solución estándar de 1413  $\mu\text{S/cm}$ , enjuagando con agua destilada los electrodos antes de iniciar las lecturas de las muestras.
6. Agitar nuevamente la suspensión e introducir el electrodo del conductímetro.
7. Registrar el valor estable de la lectura.

## **7.5. Análisis químico de biomasa**

Como se indicó al inicio de este capítulo, la caracterización química incluye métodos para el bulk y la superficie. En el caso del bulk se caracterizó la composición química y el contenido metálico.

- a) La caracterización química incluyó técnicas gravimétricas y volumétricas basadas en las siguientes normas TAPPI, ASTM y LAP/NREL, para determinar:
  - 1. Extraíbles
  - 2. Lignina
  - 3. Holocelulosa:(celulosa + hemicelulosa),
  - 4. Celulosa.
  - 5. Hemicelulosa.
  - 6. Cenizas
- b) Composición química mediante descomposición térmica, usando la técnica de desorción por temperatura programada, para cuantificar indirectamente:
  - 1. Lignina
  - 2. Celulosa.
  - 3. Hemicelulosa.
- c) Contenido metálico mediante la técnica de ICP

Por otra parte, para la caracterización superficial de la muestra se utilizó el pH, el cual se midió de forma indirecta, usando una suspensión de la muestra. Las técnicas implementadas para este proyecto se describen a continuación.

### **7.5.1. Caracterización de composición química**

Las normas utilizadas para la caracterización química fueron las siguientes.

- a) Asociación Técnica de la Industria del Papel y la Pulpa (TAPPI):

Estas normas tienen por objetivo el desarrollo de estándares certificados, que permitan maximizar el rendimiento, proporcionar nuevos métodos e ideas para mejorar la producción en el sector industrial (<http://www.tappi.org/About-Us/>)

- b) American Society of Testing Materials (ASTM):

Esta asociación es la líder mundial en el desarrollo y entrega de estándares, los cuales permiten mejorar la calidad de los productos, procurar mejor salud y seguridad, fortalecer el acceso a mercados y negocios y lograr la confianza del consumidor. ([https://www.astm.org/america\\_latina/sp/about.html](https://www.astm.org/america_latina/sp/about.html))

c) Normas de Procedimientos Analíticos de Laboratorio (LAP/NREL):

Estas normas fueron publicadas por el Laboratorio Nacional de Energía Renovable de Estados Unidos y tienen por objetivo ayudar a los científicos y analistas a caracterizar y comprender mejor la composición química de la biomasa cruda y de los productos intermedios derivados del tratamiento físico, químico y/o biológico de la biomasa (<https://www.nrel.gov/bioenergy/biomass-compositional-analysis.html>).

### 7.5.2. Extraíbles

Los extraíbles incluyen compuestos orgánicos e inorgánicos. Los compuestos orgánicos son responsables de las características de la biomasa, como el color, olor, gusto, densidad, higroscopicidad e inflamabilidad, son solubles en diferentes solventes y se clasifican en ácidos volátiles, aceites esenciales, ácidos resinosos y polifenoles (Mohan *et al.*, 2006, Lima, 2013).

El procedimiento usado para determinar su composición es el establecido por la norma **T 264 cm-97** para la caracterización de biomasa. De acuerdo con el procedimiento establecido, la cuantificación de los extraíbles implica el tratamiento de una muestra seca con una solución de etanol-tolueno, para eliminar los componentes que típicamente interfieren con análisis químicos subsecuentes. El procedimiento es el siguiente:

- a) Determinar el peso constante de un matraz fondo plano de 500 mL (*p*).
- b) Transferir 12.0 g de una muestra anhidra en el cartucho y cubrir la muestra con una porción de algodón.
- c) Colocar el cartucho de extracción en un sifón.
- d) Agregar 200 mL de solvente en el matraz; en este caso se usa mezcla de etanol: tolueno (1:2 v/v).
- e) Colocar seis perlas de ebullición en el matraz.
- f) Conectar el equipo de extracción Soxhlet en un baño de una mezcla etilenglicol-agua, a 105 C.

- g) Conectar el recirculador en el refrigerante a 2 C
- h) Monitorear la temperatura, el tiempo y el número total de ciclos por 6 h
- i) Después, lavar la muestra con 100 mL de etanol.
- j) Pesar el matraz seco con los extraíbles obtenidos (*P*).
- k) Separa la muestra previa a la segunda extracción y volver a montar el sistema de extracción.
- l) Realizar una segunda extracción con 200 mL de etanol, durante 4 h, a 105 C.
- m) Al finalizar, lavar la muestra con agua destilada.
- n) Secar la muestra en horno de convección a 70C, durante 18 h.
- o) Como última etapa, registrar el peso seco de la muestra (*M*).

Para el cálculo del porcentaje de extraíbles (%E) se usó la siguiente ecuación:

$$\%E = \left[ \frac{P-p}{M} \right] \times 100 \quad 7-8$$

Dónde:

P= Peso seco del matraz con extraíbles

p= Peso del matraz

M= Peso de la muestra seca.

La muestra de 12 g es cantidad suficiente para los análisis químicos.

### 7.5.3. Lignina insoluble en ácido

La lignina es uno de los tres componentes básicos de la biomasa lignocelulósica. La determinación de lignina insoluble se basa en la norma **T 22 om-98**. De forma general, el método consiste en tratar una muestra libre de extraíbles con una solución de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> al 72 %, para hidrolizar la celulosa, la hemicelulosa, y los minerales solubles en el ácido. Al final, la muestra se filtra y el residuo corresponde a la parte insoluble de lignina. La muestra se calcina para determinar los minerales; el residuo corresponde a la lignina. El procedimiento utilizado fue el siguiente.

- a) Pesar 1 g de muestra libre de extraíbles en un vaso de precipitados de 100 mL (*W*<sub>1</sub>)
- b) Agregar 15 mL de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> al 72%, macerando el material con una varilla de vidrio.
- c) Reposar la mezcla durante 2 h, a 20 C.

- d) Transvasar el contenido a un matraz de 1000 mL y añadir 560 mL de agua desionizada.
- e) Colocar el matraz a ebullición suave (a 80 °C) durante 4 h.
- f) Dejar que el sólido se sedimente y separarlo en un filtro Gooch, previamente tarado.
- g) Lavar el sólido filtrado con agua destilada caliente, hasta alcanzar pH cercano al neutro.
- h) Secar el sólido en un horno de convección a 60 °C, 18 h.
- i) Dejar enfriar en el desecador y pesar.
- j) Determinar el contenido de cenizas y sólidos totales del residuo obtenido de acuerdo al procedimiento descrito en los numerales 7.48 y 7.91

El porcentaje de lignina insoluble en ácido se calcula usando la siguiente ecuación:

$$\% \text{ lignina insoluble en ácido} = \frac{W_2 - W_3}{W_1} \times 100 \quad 7-9$$

Dónde:

$W_1$  = Peso de muestra inicial.

$W_2$  = Peso de crisol, lignina insoluble en ácido, y ceniza insoluble en ácido.

$W_3$  = Peso de crisol y ceniza insoluble en ácido.

#### 7.5.4. Holocelulosa

La holocelulosa es un polisacárido, que está formado por la suma de las cadenas de celulosa y hemicelulosa. Se cuantifica de acuerdo con el **método de Jayme-Wise** (Wise *et al.*, 1946, Prado *et al.*, 2012), en el que la muestra libre de extraíbles se trata con NaClO<sub>2</sub> en medio ácido (CH<sub>3</sub>COOH). Después, la muestra se separa, se lava y se deja secar a 105°C. Por último, se coloca en un desecador y se pesa. El proceso detallado es el siguiente.

- a) Pesar 2 g de muestra libre de extraíbles y colocarla en un matraz de 250 mL.
- b) Añadir 63 mL de agua desionizada.
- c) Añadir 11 gotas de ácido acético (0.2 mL) y 1.5 g de NaClO<sub>2</sub>.
- d) Introducir el matraz en un baño maría a 80 °C, durante 1 h y agitar cada 30 min.
- e) Cubrir con un vidrio de reloj

- f) Repetir los pasos c) y d), 4 ciclos más.
- g) Colocar el matraz en un baño de agua-hielo hasta que la temperatura de la muestra baje a 10 °C (aproximadamente 20 min).
- h) Después del tratamiento, separar en filtro Gooch al cual previamente se le determinó su peso constante en horno de secado a  $103 \pm 2$  C.
- i) Lavar el residuo con agua destilada hasta la eliminación de la coloración amarilla.
- j) Posteriormente, lavar con 50 mL de acetona.
- k) Secar el residuo a 60 °C, en horno de vacío, por 18 h o hasta alcanzar el peso constante.
- l) Pesar el residuo.
- m) Determinar el contenido de humedad y el porcentaje de materia orgánica del residuo obtenido, de acuerdo con los procedimientos descritos en el numeral 7.4.8. El porcentaje (%) de holocelulosa se calcula por medio de la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Holocelulosa} = \frac{(P_3 - P_2)(100 - \% H_{\text{holo}})(\% MO_{\text{holo}})}{P_1(100 - \% H)} \quad 7-10$$

Dónde:

$P_1$  = Peso inicial de muestra

$P_2$  = Peso constante de filtro Gooch

$P_3$  = Peso muestra final

$\% H_{\text{holo}}$  = % humedad de muestra holocelulosa

$\% MO_{\text{holo}}$  = % cenizas de muestra holocelulosa

$\% H$  = % humedad de muestra inicial

### 7.5.5. Celulosa

La  $\alpha$ -celulosa se determina usando la norma **TAPPI T 203 cm-99**, en una etapa subsiguiente a la determinación de la holocelulosa. En general, el procedimiento consiste en tratar el residuo de la determinación de holocelulosa con una solución de NaOH al 17.5% (en peso); después, la  $\alpha$ -celulosa se determina volumétricamente por oxidación con  $K_2Cr_2O_7$ , mediante la valoración con solución de  $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2$ . El procedimiento general es el siguiente.

- a) Pesar el residuo de holocelulosa en un vaso de precipitados de 250 mL.

- b) Añadir 75 mL de una solución de NaOH al 17.5% y empezar a medir el tiempo.
- c) Agitar de manera vigorosa durante 3 min.
- d) Añadir 25 mL de la solución de NaOH al 17.5% y mantener la mezcla a 20 C.
- e) Después de 30 min de la primera adición de NaOH al 17.5%, adicionar 100 mL de agua desionizada.
- f) Dejar a reposar a 20 C, durante 30 min más.
- g) Filtrar la solución.
- h) En un matraz de 250 mL, agregar 10 mL de la solución filtrada, más 20 mL de  $K_2Cr_2O_7$  0.5 N y 30 mL de  $H_2SO_4$  concentrado. Dejar reposar durante 15 min. Esta reacción es exotérmica y genera vapores por lo cual se debe manejar con precaución.
- i) Añadir 50 mL de agua desionizada y dejar enfriar a temperatura ambiente.
- j) Añadir de 2 a 4 gotas de indicador "Ferroin".
- k) Titular con  $[Fe(NH_4)_2(SO_4)_2]$ ; el viraje esperado es de naranja a verde-púrpura.
- l) Preparar un blanco sustituyendo la muestra con 12.5 mL de la solución de NaOH al 17.5% y 12.5 mL de agua destilada.

Los cálculos del contenido de celulosa se llevan a cabo a partir de la siguiente ecuación, haciendo notar que el porcentaje de  $\alpha$ -celulosa se debe corregir por el contenido de holocelulosa presente en la muestra:

$$\alpha - celulosa = 100 - \left[ \frac{6.85 * (V_2 - V_1) * N * 20}{A * W} \right] \quad 7-11$$

Dónde:

$V_1$  = Volumen gastado de sulfato ferroso amoniacal.

$V_2$  = Volumen del blanco.

N = Normalidad exacta de la solución de  $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2$

A = Volumen del filtrado.

W= Peso del residuo de holocelulosa, g

### 7.5.6. Hemicelulosa

La hemicelulosa es un polisacárido constituido por azúcares del tipo hexosa y pentosa, siendo las pentosas las de mayor relevancia por la proporción en que se

encuentran (Mariani, 2000). El cálculo de hemicelulosa se hace por diferencia de la cuantificación de holocelulosa y  $\alpha$ -celulosa. El procedimiento detallado es el siguiente:

1. Obtener el contenido de holocelulosa de acuerdo a la sección 7.5.4
2. Obtener el contenido de celulosa de acuerdo a la sección 7.5.5.

El contenido en hemicelulosa se calcula por diferencia entre el contenido de holocelulosa y de celulosa. Porta (2014).

$$\%Hemicelulosa = \% holocelulosa - \% celulosa \quad 7-12$$

### 7.5.7. Cenizas y materia orgánica

Las cenizas contienen los compuestos inorgánicos de las especies esenciales para el crecimiento. Sus componentes principales son sales de calcio, magnesio, potasio y en menor grado hierro. Los aniones más importantes: carbonato, fosfato, silicato y en algunas especies oxalato (Fengel y Wegener, 1989). Las cenizas permanecen como residuo luego de la combustión y calcinación (500C) de la materia orgánica de los vegetales o alimentos. La determinación de cenizas presente en la biomasa se realiza en base al método gravimétrico reportado en la Norma **ASTM E 17 55**. El procedimiento es el siguiente.

- a) Determinar el peso constante del crisol. colocando el crisol en la mufla a  $500 \pm 5$  C, durante 4 h.
- b) Pesar 1 g de muestra en el crisol.
- c) Colocar el crisol en la mufla a 500 C, durante 4 h.
- d) Concluido el tiempo, dejar enfriar la temperatura del crisol colocándolo en un horno de convección a 100 C.
- e) Colocar el crisol en el desecador hasta alcanzar temperatura ambiente.
- f) Pesar el crisol.
- g) Determinar el contenido de cenizas por gravimetría.

El porcentaje de cenizas se determina a partir de la siguiente ecuación:

$$\% Cenizas = \frac{W_1 - W_2}{W_3} \quad 7-13$$

Dónde:

$W_1$ = Peso de la capsula sin muestra.  $W_2$ = Peso de la capsula con muestra.

$W_3$ = Peso de la muestra.

Por otra parte, el porcentaje de materia orgánica (% MO) se determina a partir de la siguiente ecuación:

$$\%M.O = 100 - \% Cenizas \quad 7-14$$

#### 7.5.8. Balance de masa del análisis de composición química

Es importante verificar que la suma de los valores porcentuales determinados para extraíbles, holocelulosa, lignina y cenizas debe de ser 100%, de acuerdo con el siguiente balance:

$$\% Ceniza + \% Extraíbles + \% Holocelulosa + \%Lignina = 100 \quad 7-15$$

Si el balance de masa no se aproxima al 100% (ya sea que la desviación sea positiva o negativa), se debe revisar la réplica y la desviación estándar de las determinaciones individuales, y determinar si es razonable o explicable la diferencia observada. Si la diferencia en el balance es notoria, se puede deber a los siguientes factores (Adell, 2007):

- a) Pérdida parcial de un constituyente.
- b) Impurezas en los residuos aislados.
- c) Interferencias de otros constituyentes.
- d) Compuestos no tenidos en cuenta.

#### 7.6. Análisis termoquímico

La caracterización por Descomposición por Temperatura Programada acoplada a cromatografía de gases (TPD-CG) permite conocer la estabilidad térmica de los grupos funcionales de una muestra y, de forma indirecta, también permite identificar y cuantificar sus componentes químicos principales. Durante el experimento de TPD-CG, cada uno de estos grupos químicos se descomponen a diferentes temperaturas en moléculas de compuestos más simples, tales como gases CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, vapor de agua, los cuales se pueden analizar de dos formas: a) cualitativamente y en conjunto por medio de un detector de conductividad térmica, b) cuantitativamente, usando un cromatógrafo de gases acoplado a de TCD y aun FID. De esta forma, conociendo la temperatura y la estequiometría de la descomposición de cada compuesto químico, a través del TPD-CG

se puede validar la presencia y cuantificar el contenido de los principales componentes de la muestra de bagazo o de biochar.

Para el análisis por TPD, se cargaron 0.1 g de muestra en un reactor tubular de cuarzo, que se calentó desde Tamb hasta 900 C a 10 C/min. Durante el calentamiento se hicieron fluir 30 cm<sup>3</sup>/min de He como gas de arrastre. Los gases que se generan cuando se descomponen las estructuras químicas de la muestra se analizaron en la descarga del reactor utilizando un cromatógrafo de gases de Agilent Technologies 6850 equipado con TCD y una columna HP-PLOT Q.

### **7.7. Análisis del contenido metálico**

Las muestras derivadas de biomasa lignocelulósica incluyen en su composición un bajo porcentaje o trazas (ppm) de metales como Ti, Al, S, Cl. La presencia de metales en la especie vegetal puede derivar a dos fuentes:

- a) De origen natural: elementos esenciales, que intervienen en reacciones químicas de transferencia de electrones (reacciones de óxido-reducción) dentro de las células.
- b) De origen antropogénico: elementos presentes en la especie vegetal debido a la contaminación presente en suelo y agua.

En función del contenido metálico en la muestra se usan diferentes técnicas. La técnica más convencional para analizar metales en el rango de una millonésima (ppm), o de partes por billón (ppb), es el plasma de acoplamiento inductivo con espectrometría de emisión óptica (ICP-OES). El principio del ICP-OES inyectar la muestra líquida atomizada a un plasma de Ar. En esta condición, muestra se ioniza en el plasma y los iones emiten luz a diferentes longitudes de onda características que posteriormente se miden. Esta técnica permite analizar simultáneamente varios elementos metálicos (Agilent Technologies, 2015).

Las muestras de interés en este trabajo fueron sometidas a un análisis multi-elemental mediante ICP-OES en el Laboratorio Nacional de Biotecnología Agrícola, Médica y Ambiental (LANBAMA), del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica A.C (IPICYT). Previo al análisis, la muestra fue secado, pulverizada y tamizado a un tamaño de partícula menor a 0.10 mm. Las condiciones de análisis se

tomaron de acuerdo proyecto de norma PROY-NMX-AA-131/2-SCFI-2013, que especifica que el equipo utilizado debe ser capaz de realizar barrido en el intervalo de masas comprendido desde 5 m/z (uma) hasta 240 m/z (uma), con una resolución mínima de 1 m/z al 5% de la altura del pico (mr = masa relativa de una especie atómica; z = número de cargas). El instrumento puede estar dotado de un sistema de detección de intervalo dinámico convencional o extendido. La determinación del contenido metálico lo realiza de manera automática el equipo, estableciendo una curva de calibración para cada elemento a medir utilizando como mínimo cinco puntos de medición con concentraciones entre 0.1 y 100 ppm. Las disoluciones de materiales de referencia requeridos son de los siguientes elementos: Ag, Al, As, Au, B, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Ce, Co, Cr, Cu, Dy, Er, Eu, Fe, Ga, Gd, Ge, Hf, Ho, In, Ir, K, La, Li, Lu, Mg, Mn, Mo, Na, Nd, Ni, P, Pb, Pd, Pr, Pt, Rb, Re, Rh, Ru, Sb, Sc, Se, Si, Sm, Sn, Sr, Tb, Te, Th, Tl, Tm, V, W, Y, Yb, Zn y Zr.

#### **7.8. Medición del pH de la superficie**

El pH de la superficie de la muestra es una medida del tipo y concentración de grupos funcionales superficiales que determinan, entre otros factores, el carácter hidrofílico o hidrofóbico de una muestra. La determinación del pH superficial de la muestra se hace mediante un método electrométrico en una solución/suspensión acuosa de la muestra. La evaluación electrométrica del pH se basa en la determinación de la actividad del ion H mediante el uso de un electrodo cuya membrana es sensitiva al H. La medición se hace en una suspensión resultante de una mezcla de relación en peso muestra: agua de 1:2, de acuerdo al siguiente procedimiento.

1. Pesar 10 g de muestra en un frasco de vidrio o plástico de boca ancha.
2. Adicionar 20 mL de agua destilada al frasco conteniendo la muestra.
3. Con una varilla de vidrio, agitar manualmente la mezcla de muestra: agua a intervalos de 5 minutos, durante 30 min.
4. Dejar reposar durante 15 min.
5. Calibrar el medidor de pH Orion Star A111 con soluciones reguladores de pH 4.0 y 7.0, o bien, de pH 7.0 y 10.0, según el pH esperado en la muestra, enjuagando con agua destilada los electrodos antes de iniciar las lecturas de las muestras.
6. Agitar nuevamente la suspensión, e introducir el electrodo en la suspensión.

7. Registrar el pH al momento en que la lectura se haya estabilizado.

### **7.9. Pruebas funcionales**

Las pruebas funcionales se realizaron con el objetivo de determinar el efecto de la interacción sustrato-biochar en producción de plántulas de tomate. Como control se usó el sustrato comercial: Peat Moss de la marca comercial *Premier Horticulture Inc.*

De acuerdo a Leskovar (2001), el crecimiento de las plántulas se divide en cuatro etapas

- a) De siembra a emergencia.
- b) De emergencia a la expansión de los cotiledones.
- c) De la expansión de los cotiledones al desarrollo de hojas verdaderas.
- d) Del desarrollo de hojas verdaderas a madurez fisiológica.

Durante la etapa de crecimiento, es importante evaluar continuamente el crecimiento vegetativo y radicular de los siguientes parámetros morfofisiológicos. En la figura 7-4 se pueden identificar los parámetros morfofisiológicos que son:

#### **1. Altura de plántula:**

Proporciona información de la calidad de la plántula, se identifica un tallo vigoroso, de una altura de 10 a 15 cm para la semana 5. Se considerada desde la base del tallo o cuello de la plántula hasta el ápice de la misma. La altura se reporta en milímetros y es medida con un vernier digital (Truper).

#### **2. Diámetro de tallo:**

Determina las alteraciones que se producen en la orientación de los microtúbulos y, por tanto, en la ordenación espacial de las microfibrillas de celulosa en la pared celular, que bajo su efecto conduce a un cambio conformacional en la estructura de las láminas celulósicas por orientación de las microfibrillas en forma longitudinal, contribuyendo así al crecimiento radial de las células (Grichko *et al.*, 2001). El diámetro del tallo se considera de la parte media entre los cotiledones y el cuello de la planta. El diámetro del tallo se reporta en milímetros y se mide con un vernier digital (Truper).

### **3. Longitud hojas verdaderas:**

El desarrollo de las hojas verdaderas proporciona información acerca de la madurez fisiológica de la plántula. Se consideran verdaderas, las hojas expandidas que mostraron lámina, pecíolo, nudo, entrenudo y yema axilar. La longitud de las hojas se reporta en milímetros y se mide con un vernier digital (Truper).

### **4. Longitud de raíz:**

Proporciona información sobre el crecimiento vegetativo y radicular, si esté se encuentra avanzado o retrasado con referencia a la fecha de germinación. La raíz se considerada desde la intersección entre el tallo y la raíz. La longitud de raíz se reporta en milímetros y se mide con un vernier digital (Truper).

### **5. Peso fresco:**

Proporciona información de la madurez en la plántula. En las plantas jóvenes, el tejido foliar, tiene mayor contenido de agua debido a sus importantes funciones de intercambio de gases, fotosíntesis y transporte de nutrimentos y minerales (Lines *et al.*, 2006). *El peso fresco es el peso obtenido de la plántula, considerando hojas, tallo, raíz.* El peso fresco se reporta en gramos y se determina con una balanza analítica (Ohaus Explorer).

### **6. Peso seco:**

Proporciona información del potencial hídrico, lo que implica que el agua dentro de los tejidos estará retenida en mayor cantidad y con mayor fuerza (Wilches-Rojas *et al.*, 2008). El peso seco se obtiene del proceso de secado de las plántulas (estufa a 60 C durante 96 h). El peso seco reporta en gramos y se toma con una balanza analítica (Ohaus Explorer).

### **7. Biomasa:**

Relación del peso fresco y peso seco, proporciona información de la madurez y vigor de la plántula (Lines *et al.*, 2006).

1. Altura de plántula
2. Diámetro de tallo
3. Longitud hojas verdaderas
4. Longitud de raíz
5. Peso fresco
6. Peso seco
7. Biomasa
8. Fluorescencia de clorofila.

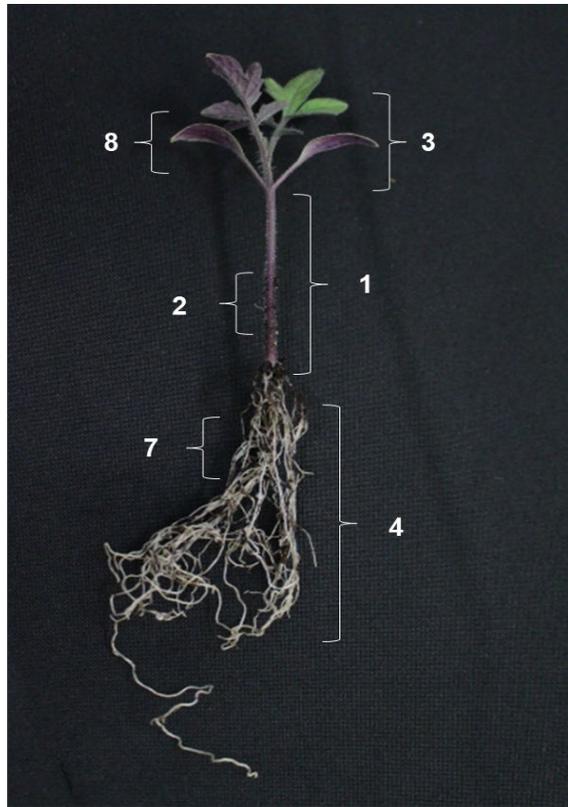


Figura 7-4. Parámetros morfofisiológicos

#### 8. Fluorescencia de clorofila:

La fotosíntesis es un proceso complejo en el cual la energía de la luz se convierte en energía química en forma de azúcares; durante este proceso se crean moléculas de glucosa (y otros azúcares) a partir de agua y dióxido de carbono, mientras que se libera oxígeno como subproducto. Las moléculas de glucosa proporcionan a los organismos dos recursos cruciales: energía y carbono fijo (orgánico). La fotosíntesis se inicia cuando la clorofila que se encuentra en la membrana de los tilacoides, los cuales constituyen la estructura de los cloroplastos en una célula vegetal, que absorbe la luz solar. En una primera etapa, conocida como etapa luminosa o fotoquímica, la energía de los rayos solares produce la excitación de los electrones y provoca la ruptura de las moléculas de agua, de tal forma que se libera oxígeno; el resto de la energía se transmite generando moléculas de ATP (Adenosina trifosfato) y NADPH (Nicotinamida adenina dinucleotido fosfato). Estos compuestos se utilizan en una segunda etapa conocida como fase oscura que se lleva a cabo en el estroma, que es el espacio acuoso interno del cloroplasto. En

esta etapa, la energía en forma de ATP y NADPH se utiliza para fijar el dióxido de carbono como carbono orgánico, mediante el Ciclo de Calvin. Este ciclo consiste en una serie de reacciones químicas en las que se producen fosfoacilglicéridos con los que la célula vegetal elabora nutrientes. El producto principal de este proceso es la glucosa ( $C_6H_{12}O_6$ ) (Downey et al., 2006, Navarro *et al.*, 2014).

En la primera etapa del proceso de fotosíntesis, la energía que no absorbe la clorofila se disipa como calor y, en menor grado, se re-emite como fluorescencia. Diversos estudios en la literatura documentan que la fluorescencia de clorofila es función de distintos factores ambientales como los cambios en la intensidad luminosa, la salinidad, la temperatura, la sequía, entre muchos otros. Estos factores modifican la función de los sistemas fotosintéticos de manera directa o indirecta y, en consecuencia, afectan la emisión de fluorescencia (Maxwell *et al.*, 2000, Navarro *et al.*, 2014, Tomas *et al.*, 2015). De esta forma, la emisión de fluorescencia de la clorofila en un sistema vegetal se puede considerar como una medida indirecta del aprovechamiento de la energía luminosa en el proceso de fotosíntesis y, en consecuencia, de los parámetros que aseguran la disponibilidad de los nutrientes que requiere las plantas para su crecimiento. Se infiere que a menor fluorescencia de clorofila existe entonces un mayor rendimiento hacia la fotosíntesis, que se puede reflejar en otros parámetros morfofisiológicos del sistema vegetal. En el caso del proyecto en desarrollo, se pretende evaluar el efecto de la composición de las mezclas de dos sustratos biochar y Peat Moss (como sustrato modelo), en el rendimiento fotosintético de las plántulas.

El análisis de fluorescencia de clorofila de las plántulas analizadas en cada una de las mezclas de sustratos se realizó con el Analizador de Rendimiento de Fotosíntesis MINI-PAM (Walz, Germany), el cual tiene las siguientes características: LED azul (470 nm), frecuencias de modulación estándar de 5 a 25 Hz ajustables en incrementos de 5 Hz, luz de medición PAR (radiación fotosintéticamente activa, PAR por sus siglas en inglés) en ajuste estándar =  $0.05 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  (Figura 7-5). La fluorescencia se midió a longitudes de onda superiores a 630 nm. Se hace notar que la longitud de onda se tiene que adaptar de acuerdo a las condiciones de la luz ambiente. Como la radiación solar tiene características espectrales similares a la fluorescencia de la clorofila (670-750 nm), obliga a utilizar una luz de baja intensidad para diferenciar la fluorescencia de la luz

ambiente. Por lo tanto, la fuente de luz actínica utilizada en el fluorómetro se enciende y se apaga con una elevada frecuencia, de forma que el sensor está preparado para detectar sólo la fluorescencia excitada por la luz de medida (Instruction *manual* for *MINI-PAM-II*, Maxwell *et al.*, 2000). Se hace referencia que la cámara de fluorescencia del equipo contiene una serie de diodos emisores de luz y detectores que captan la señal fluorescente.



Figura 7-5. Fluorómetro MINI-PAM [Manual and Documentation. Instruction manual for MINI-PAM-II]

Durante la operación del fluorómetro se aplican pulsos de saturación que se liberan con el botón de disparo remoto. Con la aplicación de pulsos se obtienen diferentes parámetros de fluorescencia estándar (Maxwel *et al.*, 2000; Baker *et al.*, 2008). Para los fines de este trabajo se destacan los siguientes parámetros que proporciona directamente el fluorómetro.

- a) **F<sub>o</sub>**: Fluorescencia mínima en hojas adaptadas a la oscuridad.
- b) **F<sub>o</sub>'**: Fluorescencia mínima en hojas adaptadas a la luz.
- c) **F<sub>m</sub>**: Fluorescencia máxima en hojas adaptadas a la oscuridad.
- d) **F<sub>m</sub>'**: Fluorescencia máxima en hojas adaptadas a la luz.
- e) **F<sub>v</sub>/F<sub>m</sub>**: Eficiencia máxima del fotosistema II (sin presencia de luz).

Es la máxima eficiencia con la que la luz absorbida por las antenas del fotosistema II es convertida en energía química.

- f) **Y (II)**: Eficiencia del fotosistema II en operativo (en presencia de luz).

Estima la eficiencia con la que la luz absorbida por las antenas del fotosistema II es usada en los procesos fotoquímicos y convertida en energía química.

Se hace notar que Y(II) se puede calcular a partir de la siguiente ecuación (Kramer *et al.* 2004).

$$Y(II) = \frac{F'_{M}-F'_{o}}{F'_{M}} \quad 7-16$$

La medición de la fluorescencia de clorofila de las plántulas germinadas en cada formulación de mezcla de sustrato se realizó a los 15, 30 y 45 días después de la germinación, en presencia de luz; la lectura se realizó sobre las hojas verdaderas de cada plántula. Para fines prácticos del caso en estudio, se reportará únicamente la eficiencia del fotosistema II en operativo Y(II). El procedimiento a seguir fue el siguiente.

- a) Colocar la hoja verdadera sobre la ventana de visualización.
- b) Aplicar pulsos de saturación que se liberan con el botón de disparo remoto. Los pulsos de saturación permitirán obtener el parámetro de fluorescencia de interés, Y(II).
- c) Realizar por triplicado la aplicación de pulsos de saturación sobre la hoja verdadera.
- d) Seleccionar dos plántulas más y repetir el análisis en la hoja verdadera.
- e) Los datos colectados de manera directa. por el usuario se almacenan en la base de datos del software WinControl-3 conectado al equipo, lo que facilita el análisis subsiguiente de los datos.

En este trabajo, la metodología desarrollada para las pruebas funcionales se adecuó del trabajo de Badia (2010) que había sido modificada por Quintero *et al.*, (2012). Se realizaron mezclas con el biochar- sustrato de acuerdo a las proporciones descritas en la Tabla 7-1. A cada mezcla se le adicionó agua corriente hasta alcanzar su punto de saturación. Para la siembra de las semillas se utilizó una charola de poliestireno de 242 cavidades de 17 mL cada una. Las mezclas se colocaron en las cavidades llenando aproximadamente  $\frac{3}{4}$  partes de la misma, posteriormente se realiza la siembra de las semillas de tomate híbrido Marca DeRuitter. Para cada formulación, se utilizaron 15 réplicas biológicas. La charola se colocó en el Semillero de la Facultad de Agronomía y Veterinaria de la UASLP y el riego se realizó diariamente con agua corriente.

Tabla 7-1 Mezclas de biochar-sustrato

Formulación	Biochar		Peat Moss	
	%	g	%	g
S100	0	0.0	100	10.0
S75	25	2.5	75	7.5
S50	50	5.0	50	5.0
S25	75	7.5	25	2.5
S0	100	10.0	0	0.0

A los 15, 30 y 45 días después de la siembra se evaluaron los tratamientos, tomando 5 plántulas de cada formulación y utilizando los parámetros morfofisiológicos anteriormente descritos. Cada variable se midió por triplicado y se realizó un análisis de varianza con el software Statisticat®. Se utilizó el promedio de todas las variables para el análisis estadístico, luego se realizó una prueba de Tukey con un nivel de significancia ( $\alpha$ ) de 5%, para determinar la formulación que aportó la mejor condición por cada una de las variables agronómicas.

## 8. RESULTADOS

### 8.1. Pre-tratamiento de la muestra

En la Figura 8.1 se ilustra los productos del proceso de selección y pre-tratamiento de la muestra de bagazo de *Agave Salmiana* recolectado en la mezcalera artesanal.

#### a) Muestreo

El muestreo se realizó en el patio de descarga de residuos de bagazo de la empresa. En total se recolectaron aproximadamente 100 kg. A su recepción en el laboratorio, la muestra se dividió en 4 lotes, de acuerdo a la fecha en que la muestra fue sometida al proceso de secado.

#### b) Secado:

El secado de la muestra se realizó en dos etapas:

Etapa 1: Secado con exposición al sol.

Etapa 2: Secado en horno de convección a 70 C por 24 h.

La determinación del contenido de humedad para cada etapa de secado se realizó de acuerdo al procedimiento descrito en la sección 7.4.1. La Tabla 8-1 incluye los resultados de secado de las muestras disponibles, a partir del peso de muestra húmeda de cada lote. El contenido promedio de humedad inicial fue de 74.15%. Después de la etapa de secado 1, la humedad promedio disminuyó a 20.3 %, mientras que después de la etapa de secado 2, el contenido de humedad disminuyó hasta 2%.

La caracterización de la muestra permitió establecer un contenido de humedad inicial promedio del 74%

Tabla 8-1. Contenido de humedad del bagazo residual de la mezcalería.

Lote	Fecha de secado	Peso de la muestra húmeda (Kg)	Contenido de humedad inicial (%)	Contenido de humedad Etapa 1 (%)	Contenido de humedad Etapa 2 (%)
1	24/06/19	20.1	71.90	18.51	1.60
2	27/06/19	24.6	74.40	25.62	1.11
3	01/07/19	44.35	75.65	19.47	2.03
4	05/07/19	10.35	74.65	17.64	2.92
Promedio			74.15	20.31	1.92

**c) Molienda:**

La molienda realizada en el molino Chipeadora Echo Bear Cat SC2206 permitió obtener un tamaño de partícula entre 1 y 0.6 mm. El análisis de la distribución de tamaño de partículas obtenido se reporta en la sección 8.3.3.

**a) Muestreo de bagazo de agave**



**Lote de 100 kg  
Humedad 74%**



**b) Etapa 1: secado al sol**



**Humedad 20%**



**c) Etapa 2: secado en horno**



**Humedad 2%**



**d) Triturado y molienda**



**Partículas entre 1 y 0.66 mm**



Figura 8-1. Proceso de preparación de la muestra.

En el esquema mostrado en la figura 8-2 se incluye el balance de masa de las etapas del pre-tratamiento. Se inició con un total de 100 kg bagazo en base húmeda. En la Etapa 1 se registró un peso de 32.5 kg, aún en base húmeda. Después de la Etapa 2 del proceso de secado se registró un peso de 26.5 kg de bagazo base seca y se tuvo una pérdida de 3 kg de biomasa debido a la manipulación de la muestra. En la etapa de molienda y tamizado, se registró una pérdida de 2.1 kg de bagazo seco, dejando un total de 20.1 kg de bagazo base seca. Es decir:

Masa Bagazo Inicial = Humedad + Perdida por Manipulación + Masa bagazo seco

$$100 = 74.5 + 3.0 + 2.1 + 20.1$$

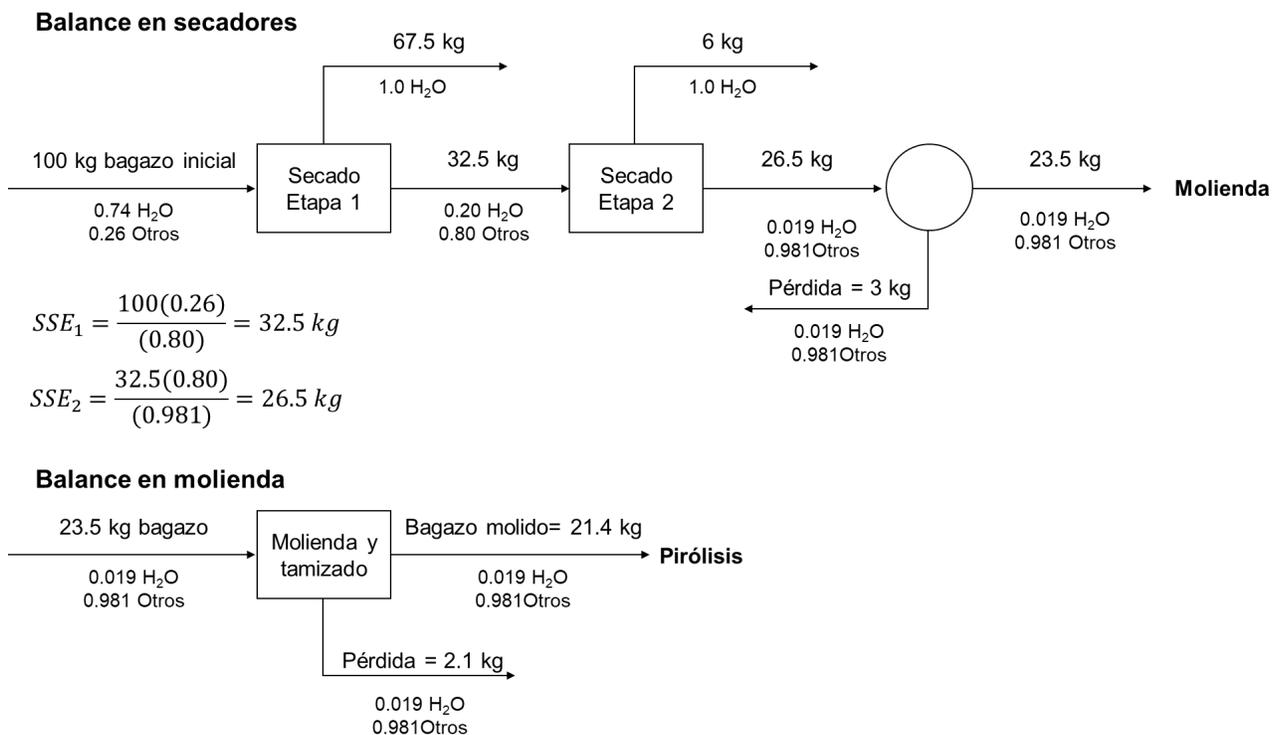


Figura 8-2. Balance de masa para pre-tratamiento de la muestra

## 8.2. Pirólisis del bagazo seco

### 8.2.1. Construcción del reactor

El reto de la construcción del pirolizador fue el tener un equipo versátil, que permitiera el estudio de diferentes tipos de biomasa, así como que fuera de bajo costo y

fácil de operar. De forma complementaria, la construcción del pirolizador presentó también los siguientes retos:

- a) Encontrar un material resistente altas temperaturas como el acero 316 y con las dimensiones apropiadas para que se adaptará a los espacios disponibles.
- b) Encontrar personal técnico de experiencia y calificado para la fabricación del reactor.
- c) Capacitar al estudiante en los conceptos básicos de operación, en el manejo de la instrumentación requerida, así como medidas de seguridad.
- d) Una vez instalado el sistema de pirólisis, validar la estabilidad de las condiciones de operación del reactor y la corrección de fugas de gas.

### **8.2.2. Condiciones de operación**

De acuerdo con Song *et al.* (2014) y Bron (2009), las condiciones de operación de la pirólisis afectan de manera directa las características del biochar; por lo tanto, se requieren definir, fundamentalmente, los siguientes parámetros:

- a) Temperatura de pirólisis:

La temperatura afecta en dos aspectos importantes. Por un parte, Hossain *et al.* (2011) indican que el rendimiento de biochar disminuye al aumentar la temperatura y que la fracción de bioaceite se incrementa al hacer la pirólisis a  $T > 500$  C. Por otro lado, la temperatura de pirólisis tiene efecto en el pH de la superficie. Kim *et al.* (2012) indican que el biochar producido a  $300 < T < 400$  C presentan pH ligeramente ácidos, en comparación del biochar que se produce a  $T > 500$  C, que es de carácter básico. Con base al hecho que en el proyecto se propone obtener un rendimiento preferente de biochar que tenga un carácter superficial neutro o ligeramente ácido ( $6 < \text{pH} < 7$ ), se propuso una temperatura de pirólisis de 350 C:

- b) Tiempo de tratamiento:

En este caso no se tiene documentando el efecto del tiempo de tratamiento a una determinada temperatura de operación. Inicialmente se propuso utilizar 60 min.

- c) Velocidad de calentamiento:

La velocidad de calentamiento a temperatura de pirólisis baja (300 - 400 C) influye en el rendimiento del biochar. A una velocidad de calentamiento de mayor a 10 C/min, se incrementa el rendimiento de la fracción líquida y gaseosa. Por el contrario, una velocidad

de calentamiento de 1- 10 C/min favorece el rendimiento de biochar; valores característicos son rendimientos del 35%. (Demirbas, 2004; Kim *et al.*, 2012). En este caso, se eligió una velocidad de calentamiento de 10 C/ min

d) Flujo de alimentación

El flujo de gas a través del reactor se usa para mantener la atmosfera inerte y para hacer el arrastre de los gases producidos durante el tratamiento térmico. De acuerdo a sistemas de reacción similares que se ha usado previamente en el equipo de trabajo, un flujo de 100-200 ccm es adecuado para cumplir con los dos propósitos indicados. Por esta razón se sugirió inicialmente utilizar un flujo de 100 ccm.

e) Carga al reactor

La carga al reactor es función de la densidad y tamaño de partícula del reactor. Desde un punto de vista práctico, es pertinente que el peso de muestra cargado al reactor y el tipo de empaquetamiento de la muestra, así como el flujo de alimentación, no originen una caída de presión en el reactor mayor a 5-10 psi, para evitar puntos de fuga del gas o cualquier otro problema de seguridad. De esta forma, las pruebas preliminares sugieren que una carga al reactor de 45 g es conveniente para operar en condiciones seguras.

f) Relación W/F

La relación del peso de muestra al flujo de gas en la alimentación (W/F) es un parámetro de operación característico en reactores continuos. Esta relación W/F se usa para el escalamiento del proceso a escalas piloto. En este caso, W/F fue igual a 0.45 gmin/cm<sup>3</sup>.

En la Tabla 8-2 se resumen las principales condiciones de operación del reactor y las características de una carga distintiva al pirolizador.

Tabla 8-2. Resumen características de pirolizador y muestra a tratar

Características de pirolizador		Características de la muestra	
Tipo de reactor	Lote para solido; continuo para gas inerte	Tipo de muestra	Bagazo seco de <i>Agave Salmiana</i>
Dimensiones del reactor (cm):	Longitud: 30 cm. D interno: 4 cm.	Tamaño de partícula (mm):	0.6 – 0.8

H/D	7.5
Volumen (cm <sup>3</sup> )	377
Gas inerte	He @ 100 ccm
Velocidad calentamiento	10 C/min
T máxima (C)	350
t tratamiento (min)	10

Densidad de partícula (g/cm <sup>3</sup> )	1.4
Carga por lote (g)	45
Numero de lotes	20

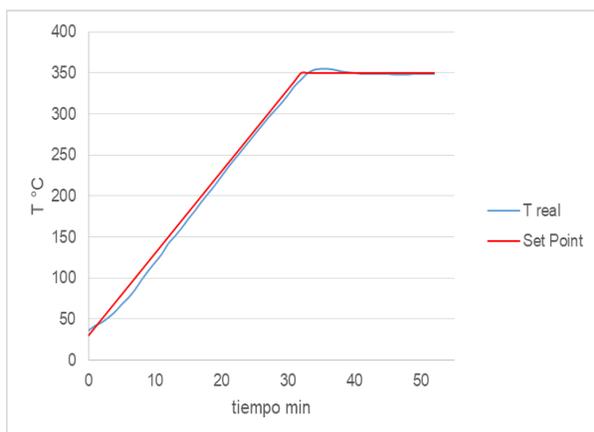
### 8.2.3. Calibración de periféricos

En la implementación del sistema de pirólisis se llevó a cabo la validación de la operación de algunas variables relevantes.

#### a) Calibración del control de la temperatura

Con el reactor sin carga de biomasa, se realizó una curva del perfil de temperatura medida por el termopar en función del programa de temperatura consistente en una rampa de 10 C/min, desde temperatura ambiente hasta 350 C y después mantener de forma indefinida la temperatura. Durante la operación se mantuvo un flujo de He a lo largo del reactor de 131 ccm. El tiempo de calentamiento fue de 32 minutos y posteriormente el sistema alcanzó la temperatura de 350 C y se mantuvo alrededor de la misma durante 60 min. Los resultados se incluyen en la figura 8.3 a) en el gráfico se puede observar que no existe desfase significativo en la temperatura real y el set point, por lo que se valida el adecuado funcionamiento del termopar en el sistema de reacción sin carga. Posteriormente se realizó una curva de calibración replicando el programa de temperatura y con el reactor cargado con 45 g de biomasa, los resultados se incluyen en la figura 8.3 b) donde se observa un desfase de temperatura entre los 30 y 300 C respecto a la lectura de la temperatura real y el set point. La diferencia de temperatura se ve disminuida después de los 300 C. Se ha permitido identificar las diferencias de temperatura y las zonas críticas durante la reacción por lo que se ha determinado que, durante la reacción, no se debe presentar una diferencia mayor a los 10 C entre la temperatura real y el set point, esto es para evitar un incremento fuera de rango en temperatura, lo que puede provocar una mayor heterogeneidad en el biochar obtenido respecto a otros lotes, pues se ha tratado en condiciones de temperatura diferente.

a) Reactor sin carga



b) Reactor con carga

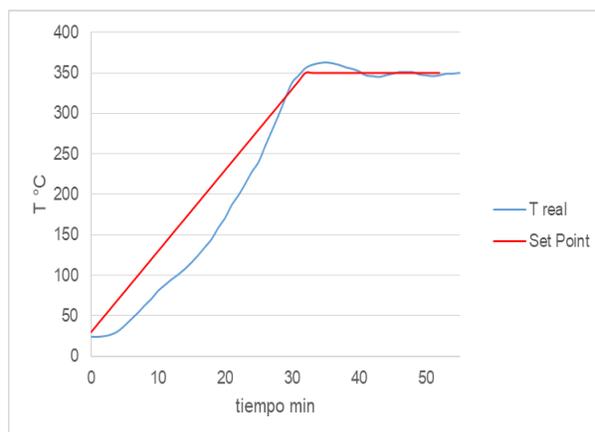
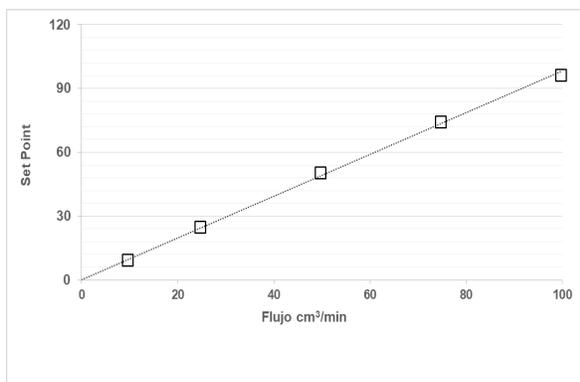


Figura 8-3. Curva de calibración del controlador de temperatura y termopar

**b) Control del flujo volumétrico de He**

Con el reactor sin carga de biomasa, se realizó una curva del controlador de flujo másico en el rango de 0 a 100 ccm de He. Los resultados se muestran en la Figura 8.4 a), la tendencia es lineal entre el set point y el flujo real medido, por lo que se valida el adecuado funcionamiento del controlador de flujo másico con el reactor sin carga. Posteriormente se realizó la curva de calibración con el reactor cargado y se puso en marcha el programa de temperatura descrito anteriormente, los resultados se observan en la Figura 8.4 b), se puede observar el desfase entre el flujo real y el set point, sin embargo, esto se atribuye a las reacciones propias de descomposición de la biomasa que se llevan a cabo durante la pirólisis.

a) Reactor sin carga



b) Reactor con carga

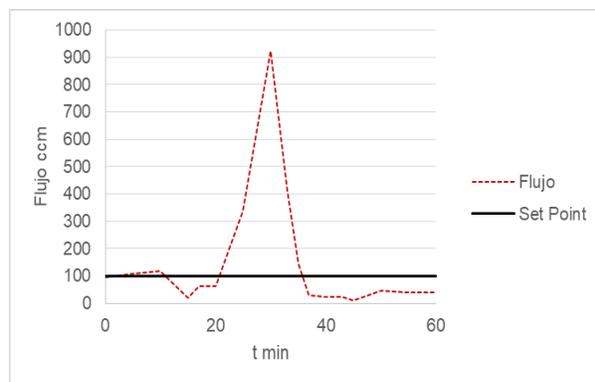


Figura 8-4. a) Curva de calibración de flujo másico, b) flujo volumétrico a la descarga del reactor durante la pirólisis

#### **8.2.4. Medidas de seguridad**

En esta etapa se contó con un proceso de capacitación para la correcta operación que incluye medidas de seguridad en la operación:

- i) Monitoreo de la presión durante la reacción.
- ii) Equipo de protección personal.
- iii) Medidas adecuadas para la manipulación del reactor así como para la colecta manual de los productos generados en el proceso de pirólisis.
- iv) Caracterización de los componentes del reactor, funcionamiento de los equipos, posibles fallas que se pudieran presentar y las acciones preventivas y correctivas para minorar daños.

#### **8.2.5. Operación del reactor**

El equipo en operación se muestra en la figura 8.5. El proceso de operación del reactor consiste en primera instancia en armar el cuerpo del reactor (módulo de alimentación zona A), donde se colocan dos rejillas de acero, una en la parte inferior y otra en la parte superior, para evitar que la biomasa sea arrastrada por el flujo de gas durante la reacción. Posteriormente se realiza la carga del reactor con 45 g de biomasa. La carga se hace de manera manual evitando la compactación de la biomasa, el cuerpo del reactor se instala en el horno de acero inoxidable, y se sella con la parte superior del reactor. Posteriormente se conecta al reactor el controlador de flujo másico, el controlador de temperatura y el termopar, así mismo se instalan las tres trampas de limpieza de gases condensables. Una vez armado el sistema se hace pasar 100 ccm de He 5.0 ultra alta pureza y mediante el burbujómetro se revisan las fugas dentro del sistema de reacción, en las conexiones y en las trampas. De presentarse alguna fuga, el sistema se revisa nuevamente y se colocan sellos plásticos. Revisadas las fugas, se enciende el autotransformador variable de corriente para comenzar a suministrar la corriente eléctrica al horno y comenzar el proceso de reacción, es importante el monitoreo de la temperatura, la presión y el flujo durante la reacción. Transcurrido el programa de temperatura que es de 62 min, el sistema se apaga y se deja enfriar. El tiempo de enfriamiento aproximado es de 120 min. El siguiente paso del proceso, es la recolección de los productos, el bioaceite se recuperó usando la válvula ubicada en la parte inferior cónica del reactor, los efluentes gaseosos del reactor, se lavaron en un conjunto de

trampas a 4 C y son recolectados en las bolsas tipo “Tedlar” para su posterior análisis, por último, el biochar se descarga una vez que el cuerpo del pirolizador se enfría totalmente, el biochar obtenido es pesado y almacenado en bolsas de plástico correctamente selladas.

Entre cada lote de biomasa procesado, el reactor se somete a un proceso de limpieza para evitar la acumulación de residuos, que consiste en:

- I. El cuerpo del reactor se enjuaga con acetona grado reactivo y posteriormente se lava con jabón alcalino, libre de fosfatos al 20%.
- II. Las conexiones de acero inoxidable se sumergen en acetona grado reactivo y se sónica durante 10 minutos, posteriormente se lava con jabón alcalino, libre de fosfatos al 20%.

a)



b)



Figura 8-5. Sistema de pirólisis en operación

a) Monitoreo de temperatura en el pirolizador.

Como se indicó, en el cabezal del pirolizador se tiene un termopozo en el que se insertó el termopar usado para medir la temperatura en el interior del pirolizador. Se hace notar que la temperatura medida es solo representativa del sistema, ya que, si bien el termopar se ubica al centro del reactor tanto longitudinal como radialmente, no se descarta que hay distribución de temperatura en ambas direcciones debido, entre otros

factores, a posibles acanalamientos en la carga del reactor, así como en la heterogeneidad de la misma.

La temperatura se monitorea cada minuto y los resultados representativos se incluyen en la figura 8.6. Se puede observar que a temperaturas entre los 30 y 200 C se observa un rango de diferencia entre 40 y 50 C entre la temperatura real y el set point. La diferencia se comienza a acotar a partir de los 280 C con un rango de diferencia entre 10 y 20 C, por lo tanto, el perfil de la temperatura real y el set point no es lineal. Esta tendencia se observó en los 20 lotes de biochar sintetizado, por lo que se considera que afecta de la misma forma la homogeneidad de las muestras. Una vez que la reacción alcanza el máximo de temperatura, 350 C, la diferencia de la temperatura se registra en  $\pm 5C$ , en ninguno de los lotes se observaron incrementos de temperatura fuera de este rango.

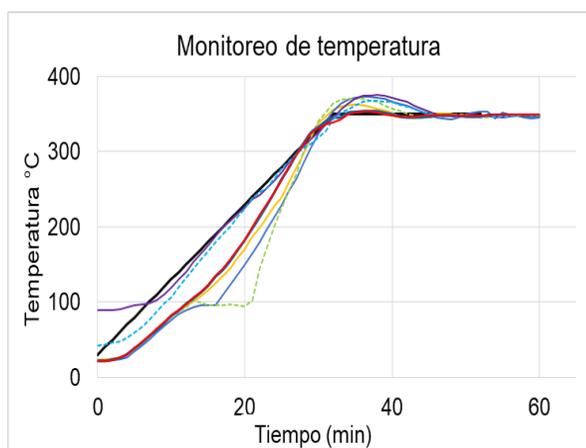


Figura 8-6. Perfil de temperatura

b) Monitoreo del flujo volumétrico a la salida del reactor.

El flujo del He en la alimentación se fijó en 100 ccm. Durante la reacción, el flujo de gas a la descarga del reactor se monitorea continuamente. Este flujo se midió después de que el efluente del pirolizador pasó a través de las trampas para condensar los productos y lavar los gases incondensables. Una serie representativa de resultados se muestran en la Figura 8.7. Notoriamente, se observa un significativo incremento del flujo volumétrico entre 20 y 35 min, que corresponden a temperaturas de 200 y 300 C, respectivamente. El flujo volumétrico a la descarga se incrementó hasta 200 - 400 ccm. El incremento del flujo volumétrico se asoció a la descomposición de algunos

componentes de la biomasa lignocelulósica, probablemente celulosa y hemicelulosa, como ha sido sugerido en la literatura (Mohan *et al.*, 2006).

Es necesario señalar que durante el monitoreo de la reacción, se identificaron fugas en el sistema de reacción atribuidas al incremento de presión en el sistema de tratamiento y a la falta de un sello eficiente en los cabezales del pirolizador. En futura experimentación, se sugiere cambiar el diseño interno del cabezal para lograr un sello hermético, implementar conexiones de acero inoxidable en todo el sistema de reacción y cambiar el punto y método de medición de flujo a la descarga del reactor.

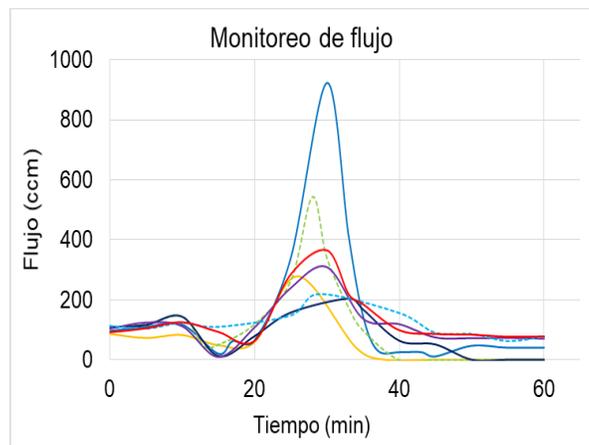


Figura 8-7. Monitoreo del flujo de reacción.

### c) **Producción de biochar**

Una vez terminada la reacción y enfriado el pirolizador se descargó el biochar producido. Después se pesó el producto sólido. Los pesos de biochar en cada uno de los experimentos se incluyen en el anexo A. De acuerdo con estos resultados, el promedio del peso de biochar producido en cada lote fue de 19 g. Tomando en cuenta que la carga inicial de bagazo fue de 45 g ( $\Rightarrow W/F = 0.45 \text{ gmin/cm}^3$ ), el rendimiento de producción de biochar a partir del bagazo, en las condiciones experimentales indicadas en la Tabla 8-2, fue de 40%. Como referencia, Urien *et al.*, (2013) reportaron que en la pirólisis lenta de madera de abeto, a 400 C ( $W/F = 30 \text{ gmin/cm}^3$ ), tuvieron un rendimiento de producción de biochar del 27%. Por otra parte, Suarez *et al.* (2019) reportaron que en la pirólisis lenta de mesocarpio de cacao ( $W/F = 2 \text{ gmin/cm}^3$ ) a 500 C, obtuvieron un rendimiento de producción de biochar del 35%. Con base a estos resultados se puede establecer que

las condiciones usadas en este trabajo producen un rendimiento de biochar mayor del 5% al reportado en la literatura.

**d) Producción de bioaceite.**

El bioaceite se colecta por la parte la válvula ubicada en la parte inferior del reactor. La muestra se colecta en recipientes de plástico y se almacena a temperatura ambiente. En promedio se recolecta entre 0.5-1.0 g por lote lo que corresponde a 2% en peso. El rendimiento de bioaceite con las condiciones experimentales descritas en la Tabla 8-2 es mucho menor a las reportadas en la literatura, Urien *et al.*, (2013) reportaron que en la pirólisis lenta de madera de abeto, a 400 C, tuvieron un rendimiento de producción de bioaceite del 53%, para la misma biomasa con un tratamiento de pirólisis lenta a 600 C, obtuvieron un rendimiento de bioaceite del 46%. Con base a los resultados obtenidos, se demuestra que las condiciones como la temperatura y la materia prima utilizada en el proceso, se modifican para obtener el producto de pirólisis de mayor interés.

**8.2.6. Resultados representativos.**

En la figura 8.8 se muestra la apariencia de los 3 productos generados durante la pirólisis de biomasa.

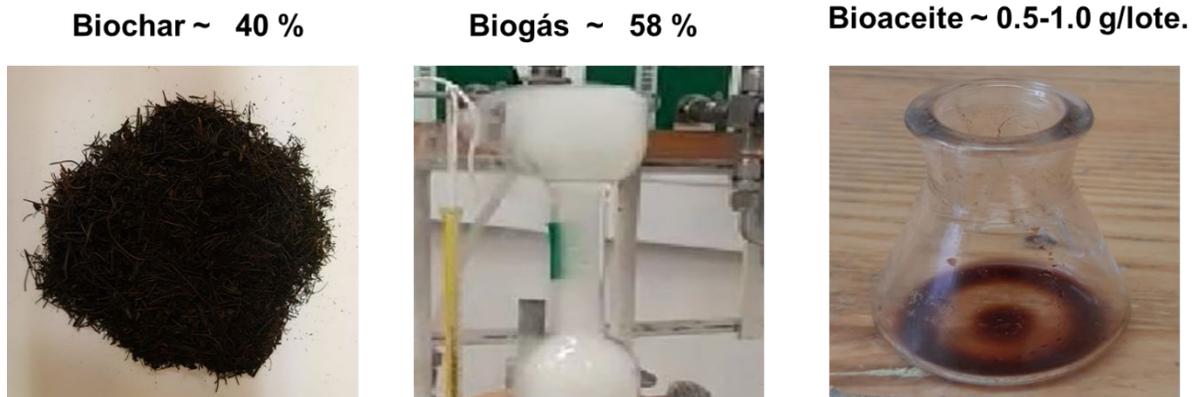
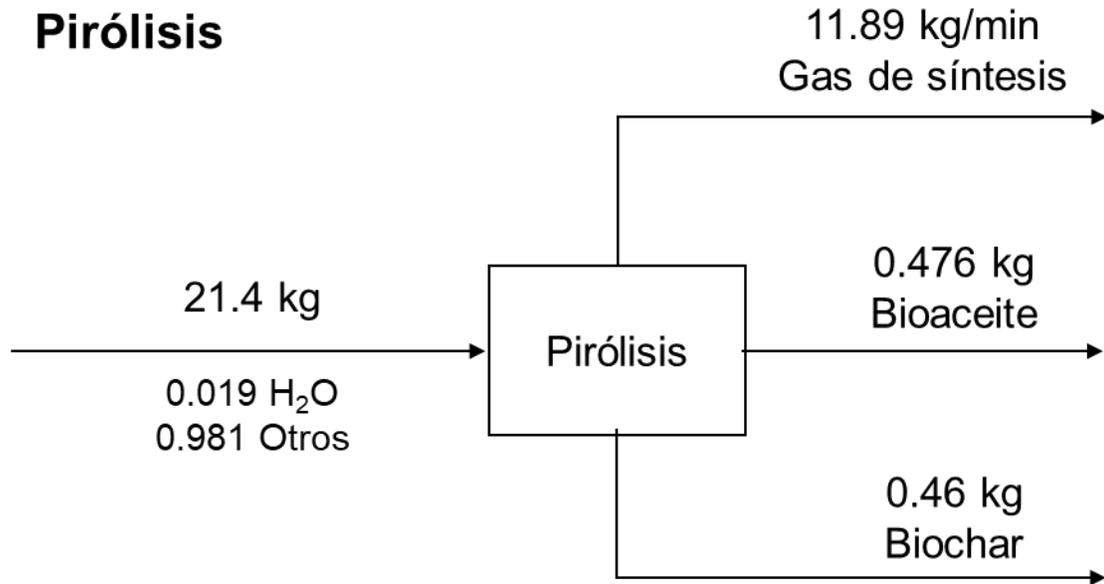


Figura 8-8. Productos de pirólisis

En la figura 8-9 se esquematiza el balance de masa para el proceso de pirólisis. Donde se considera el valor promedio de cada uno de los 20 lotes, los productos obtenidos de la pirólisis del bagazo de *Agave Salmiana* respecto a la materia prima alimentado al pirolizador es la siguiente:

1. Biochar (medido): 42% en peso
2. Bioaceite (medido): 0.5-1.0 g, que correspondió a 2% en peso
3. Gas de síntesis (estimado): 56% en peso, basado en el balance de los dos productos medidos.



$$R_{\text{Biochar}}^{\text{Pirólisis}} = 42.22\%$$

$$R_{\text{Biochar}}^{\text{Proceso}} = 9\%$$

Figura 8-9. Balance de masa en pirólisis

De acuerdo con la literatura, los rendimientos de biochar en la pirólisis lenta de bagazo varían entre 20 – 45 %, en función de la materia prima y de las condiciones de operación. Para el caso del bioaceite se reportan rendimientos entre 30 - 50 % (Urien *et al.*, 2013, Suarez *et al.* 2019). Los rendimientos reportados para el gas de síntesis se encuentran entre los 20 – 30%. En este estudio, los rendimientos de biochar se encuentran en los rangos referidos en la literatura. Con base a esto se puede establecer que, en las condiciones de temperatura, velocidad de calentamiento y tiempo de reacción usada para la pirólisis lenta de *Agave Salmiana* son convenientes para obtener el mayor

rendimiento de Biochar. Sin embargo, también se pueden obtener fracciones de gas de síntesis suficientes para su posterior estudio y valorización.

Para los intereses de este proyecto, la caracterización del biochar se realizó de acuerdo a la estrategia indicada en las secciones 7.4 a 7.9.

### 8.3. Análisis físico

Para realizar la secuencia de análisis físico (humedad, densidad, tamaño de partícula, pH, conductividad) del bagazo de *Agave Salmiana* se tomó una muestra representativa de 300 g de cada lote, esta muestra se tomó en base seca y sin ningún pre-tratamiento adicional. El análisis para cada determinación se realizó por triplicado y se reporta el promedio de estos. La Tabla 8-3 resume el reporte de análisis físicos para el bagazo seco, el biochar y los sustratos comerciales.

Tabla 8-3. Reporte de análisis físico

Determinación	Bagazo seco Lote 1	Biochar	Peat Moss	Fibra de coco
Humedad (%)	3	2.38	22.02	5.38
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	1.4	0.8	0.4	0.22
Tamaño de partícula (mm)	0.6 y 0.85	0.6 – 0.8	0.44	1 - 2
pH	6.06	7.85	6.48	5.95
Conductividad dS/m	0.576	0.718	1.935	1.815

#### 8.3.1. Determinación de humedad

Para la mayoría de los procesos de conversión energética es imprescindible que la biomasa tenga un contenido de humedad inferior a 30%. Muchas veces, los residuos salen del proceso productivo con un contenido de humedad muy superior, lo que obliga a implementar operaciones de acondicionamiento, antes de ingresar al proceso de conversión de energía (De Lucas y Del Peso, 2012). El contenido de humedad de la muestra de trabajo una vez aplicado el proceso de secado, se determinó, en promedio de 2%.

El contenido de humedad para el biochar se reporta en 2.38%. Para el caso del Peat Moss 22.02% y la fibra de coco en 5.38%. El contenido de humedad está relacionado con la capacidad de retención de agua. Se considera óptimo que el contenido de un sustrato se encuentre entre 16.58 a 22.89%. (Mohamed et al., 2016).

### **8.3.2. Densidad**

La densidad es una propiedad física clave en diferentes etapas de la logística y del procesamiento termoquímico de la biomasa. Bhagwanrao *et al.*, (2014) reportan que la densidad está relacionada con el tamaño y la forma de las partículas para una muestra de bagazo de agave. Las densidades aparentes de diferentes materias primas de biomasa muestran una amplia variación, desde 1.5 a 2.0 g/cm<sup>3</sup> para cereales hasta 2.8 a 4.8 g/cm<sup>3</sup> para de madera dura (Cheng, 2009). En la Tabla 8-4 se resumen los valores obtenidos para cada lote. La desviación estándar se calculó en 0.23 g/cm<sup>3</sup> y en promedio se reporta una densidad de 1.4 g/cm<sup>3</sup>.

De acuerdo con Pastor-Villegas *et al.*, (2006), hay una relación entre la temperatura de tratamiento durante la pirólisis y la densidad del biochar. Los autores sugieren que, a menor temperatura durante el tratamiento termoquímico, la densidad de Biochar será mayor, lo cual está asociado con la conversión de carbón, ya que a mayor temperatura se desordena la estructura de la red de biomasa y genera baja densidad en la estructura. Los resultados obtenidos para el biochar sintetizado reportan una densidad 0.8 g/cm<sup>3</sup> partiendo de una densidad inicial del bagazo de agave de 1.4 g/cm<sup>3</sup>. Brewer (2014) reportan un intervalo de densidad de 0.2 a 0.5 g/cm<sup>3</sup> para biochar, dependiendo de la materia prima y del proceso de pirólisis.

Para el caso de los sustratos la densidad fue, para el Peat Moss 0.4 g/cm<sup>3</sup> y para la fibra de coco en 0.22 g/cm. En un sustrato se considera óptimo de 0.1 a 0.8 g/cm<sup>3</sup>, con un valor mínimo de 0.3 a 0.4 g/cm<sup>3</sup>., este rango permite que las plántulas se sostengan de manera eficiente sin que el peso el materia sea excesivo y dificulte el manejo y transporte. De acuerdo a los resultados obtenidos el biochar se encuentran dentro de los rangos óptimos para la producción de especies vegetales (Glaser *et al.*, 2000, FAO, 2008).

Tabla 8-4. Análisis de densidad

	Lote 1	Lote 2	Lote 3	Lote 4	Promedio
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	1.2	1.8	1.5	1.3	1.4

### 8.3.3. Tamaño de partícula

La distribución del tamaño de partícula de la muestra de bagazo de agave se reporta con 41% de partículas de 0.6 mm y 27% de 0.8 mm. En menor proporción, con 5% mayores a los 2 mm. La mezcla de tamaño de partículas se considera adecuado para el proceso de conversión termoquímica. De acuerdo a la literatura, la forma y el tamaño de las partículas de la biomasa afectan:

- a) la homogeneidad de la mezcla,
- b) el área específica,
- c) las transferencias de calor y masa y,
- d) el comportamiento de flujo de las partículas.

En el caso de la pirólisis lenta, con un rango de velocidades de calentamiento de 5-30 C/min, se requieren partículas de mayor tamaño (hasta de varios cm). Para el caso de un tratamiento de pirólisis lenta, la materia prima se debe procesar a un tamaño de partícula fino (polvos), por lo que el biochar obtenido será muy fino y en menor rendimiento.

Así, el tamaño de partícula del bagazo afecta el tamaño de partícula de biochar, ya que a mayor temperatura de tratamiento, se observa mayor reducción del tamaño de partícula en biochar. Por lo tanto, la materia prima con diferentes formas y tamaños puede tener diferentes eficiencias de conversión y requerimientos de energía (Cetin *et al* 2004, Lehmann *et al.*, 2009). Una vez que el bagazo es sometido al tratamiento de pirólisis, la distribución del tamaño de partícula reportado para el biochar sintetizado es de mayoritariamente 40% de partículas de 0.6 mm, 21% de partícula de 0.8 mm y 20% de partículas mayores a los 0.3 mm. Para el caso del Peat Moss, la distribución de partícula preferentemente es de 0.44 mm con 48%. Para la fibra de coco, se tiene partículas preferentemente gruesas, entre 1 y 2 mm con el 60%. Para el caso de un sustrato el tamaño de la partícula recomendada es de mediana a gruesa, con tamaños de 0.25 a 2.6

mm, lo que permite que la plántula tenga disponibilidad de agua (Glaser, *et al.*, 2000). El biochar se encuentra dentro de los rangos recomendados.

#### **8.3.4. pH**

La biomasa se reporta en 6.06 unidades de pH. De acuerdo a Nanda *et al.*, (2015) la temperatura a la cual se efectúa el tratamiento térmico afecta de manera directa el pH del biochar obtenido. A temperaturas mayores que 500 C se obtendrá un pH alcalino (>9), mientras que a menores que 400 C darán pH ácidos (entre 7 y 8). El tratamiento de pirólisis a 350 C aplicado la biomasa permitió obtener un biochar con pH de 7.9. De acuerdo con la literatura, el biochar puede presentar valores de pH de 6.5 hasta 12, dependiendo del tipo de biomasa y las condiciones del proceso de pirólisis (Lehmann *et al.*, 2009, Van Zwieten *et al.* 2010, Lehmann *et al.*, 2011). En la Tabla 8-5 se reportan algunos ejemplos de valores de pH, los resultados expresados arrojan una tendencia de aumento de pH respecto a la temperatura, Jung *et al.*, (2015) con un tratamiento de pirólisis de 300 C, reporta un pH de 7, el caso de estudio, con un tratamiento de 350 C, reporta un pH de 7.9, Liu *et al.*, (2012), para un tratamiento de 450 C, reporta un pH de 8 y finalmente Inyang *et al.*, (2011), para una temperatura de 600 C, reporta un pH de 8.6.

Para el caso de un sustrato, el pH es el indicador principal de la disponibilidad de nutrientes para las plantas, influyendo en la solubilidad, movilidad y disponibilidad. Para el tomate el valor del pH ideal es 6.5, debido a que favorece la absorción mineral de Ca y Mg, mejorando el estado nutricional de la planta. (FAO, 2015). El Peat Moss en su estado natural tiene un pH ácido de 4.0 por lo que es necesario mezclarlo con zeolitas para aumentar su pH, la muestra de trabajo tiene reporta un de 6.48. La fibra de coco reporta un valor de 5.95. El biochar presenta un pH ligeramente alcalino de 7.85 unidades, por lo que se sugiera la adecuación de este parámetro mediante tratamientos con ácidos orgánicos débiles como ácido acético en bajas concentraciones.

Tabla 8-5. Valores de pH para diferentes tipos de biochar

Biomasa	pH	Condiciones de tratamiento	Referencia
Arroz	8	Pirólisis a 450 C	Liu <i>et al.</i> , 2012
Rebaba de pino	7	Pirólisis a 300 C	Jung <i>et al.</i> , 2013
Bagazo de caña de azúcar	8.6	Pirólisis a 600 C	Inyang <i>et al.</i> , 2011
Bagazo de agave Salmiana	7.9	Pirólisis a 350 C	Caso de estudio

Posteriormente se evaluaron los parámetros de pH para cada mezcla sustrato – biochar para evaluar el efecto del biochar sobre el Peat Moss respecto al pH. La determinación se realizó por duplicado y de acuerdo al procedimiento descrito en el numeral 7.4. En la Figura 8-10, se presentan los resultados para cada formulación, los valores varían entre 6.4 y 7.8. Se puede observar que la relación entre la cantidad de biochar y sustrato es lineal, la tendencia es que a menor cantidad de biochar presente en la mezcla, los valores de pH son menores. Las formulaciones S75 y S50, tienen los valores más cercanos a los requerimientos del tomate, por lo que en las pruebas funcionales se esperan resultados similares a la formulación S100.

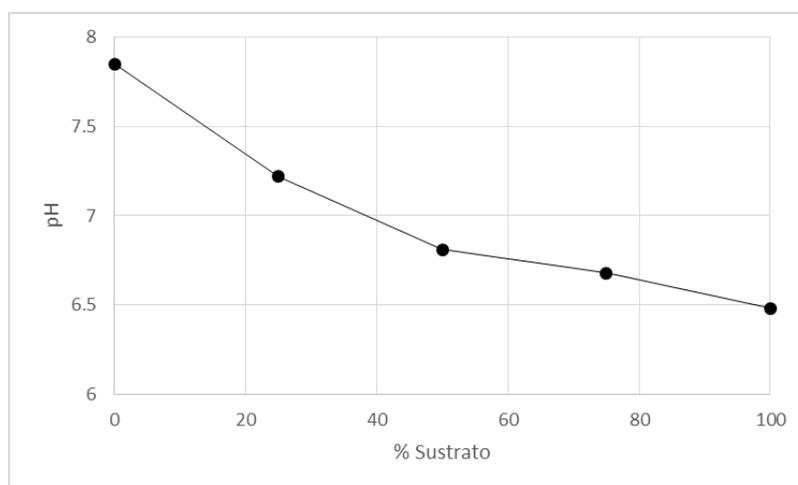


Figura 8-10. Análisis de pH para las mezclas biochar-sustrato

### 8.3.5. Conductividad

La conductividad eléctrica (CE) para el bagazo de agave fue de 0.576  $\mu\text{S}/\text{m}$ . Este parámetro es afectado por el tratamiento de pirólisis. Por ejemplo, Lehmann (2007) reporta que a mayor temperatura de pirólisis, la CE del biochar también aumenta; además, indicó que la CE de un biochar derivado de pirólisis puede variar de 0.5 hasta

2.0  $\mu\text{S m}^{-1}$ . En este trabajo, el tratamiento de pirólisis a 350 C dio como resultado un biochar con una conductividad de 0.71  $\mu\text{S cm}^{-1}$  encontrándose dentro del rango de valores reportados en la literatura.

La conductividad es la capacidad de intercambio del sustrato para conducir a los nutrientes, se considera como óptimo para su aplicación agrícola valores ente 0.75 y 2.0  $\mu\text{S m}^{-1}$  ya que en este rango es más fácil la asimilación de nutrientes para la plántula (Lehmann 2007). Otros autores como Zarate (2004) reportan que la conductividad eléctrica del suelo para que el tomate tenga un desarrollo óptimo deberá encontrarse entre 0.75 a 2.0  $\mu\text{S/cm}$ . Para el caso del Peat Moss la C.E se reportó en 1.935 dS/m y la fibra de coco en 1.815 dS/m que se encuentran dentro de los parámetros reportados, sin embargo el biochar al 100% presenta un una conductividad de 0.718  $\mu\text{S/cm}$ , una manera de realizar el ajuste de conductividad es agregando soluciones salinas al sustrato, ricas en fosfatos antes de la siembra.

Posteriormente se evaluaron los parámetros de conductividad para cada mezcla sustrato – biochar de acuerdo al procedimiento descrito en el numeral 7.44. En la figura 8-11 se presentan los resultados para cada formulación, los valores varían entre 0.71 y 1.935, para el caso de la conductividad no hay una relación lineal entre el contenido de biochar presente en la mezcla. La formulación S75 se reporta entre los requerimientos óptimos, por lo que se espera que las pruebas funcionales arrojen resultados similares a la formulación S100.

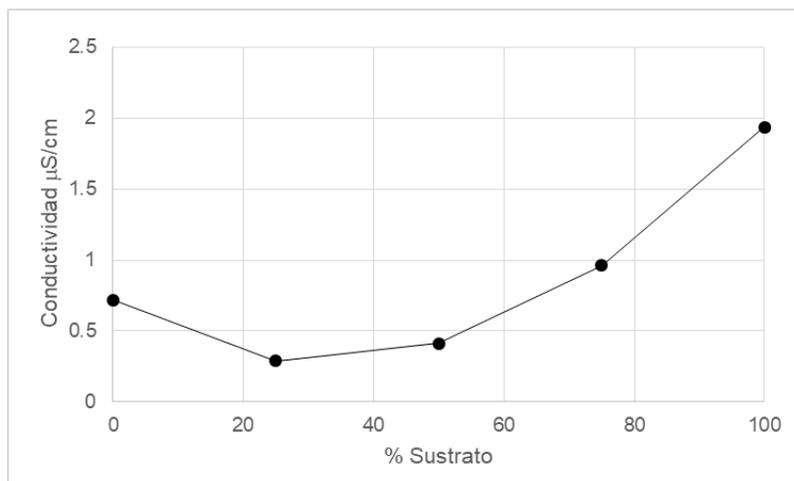


Figura 8-11. Análisis de conductividad para las mezclas biochar-sustrato

#### 8.4. Análisis químico de los sólidos

Para el análisis químico de cada uno de los 4 lotes del bagazo de *Agave Salmiana* se utilizaron 30 g de muestra base seca, con un tamaño de partícula menor a 0.6 mm y con un contenido de humedad de 2%. A continuación, se realiza un análisis de los resultados obtenidos para cada parámetro y los valores correspondientes se incluyen en la Tabla 8-6.

Tabla 8-6. Resultados del análisis químico del bagazo de *Agave Salmiana* base seca

	% Desviación	Lote 1	Lote 2	Lote 3	Lote 4	Promedio	Baena, 2005	Saucedo <i>et al.</i> , 2011	Abreu <i>et al.</i> , 2013
Extraíbles (%)	0.8	9.43	12.83	8.60	18.42	12.32	10.23	15.20	18.39
Lignina (%)	1.9	15.69	12.47	11.71	8.67	12.14	8.15	10.10	14.86
Celulosa (%)	1.8	33.39	29.65	33.08	34.50	32.66	37.27	42.01	44.19
Hemicelulosa (%)	1.7	23.31	23.87	26.26	23.22	24.17	8.18	20.00	22.56
Materia orgánica (%)	0.5	86.71	85.90	83.40	85.53	85.38	92.50	N.D	91.84
Cenizas (%)	0.5	13.29	14.10	16.60	14.47	14.62	7.50	N.D	8.16
<b>Balance</b>		<b>95.11</b>	<b>92.92</b>	<b>96.25</b>	<b>99.28</b>		<b>71.33</b>		<b>99.94</b>

##### 8.4.1. Extraíbles

La determinación de los extraíbles es relevante para cuantificarlos y para validar el protocolo para eliminarlos de otras etapas de proceso en las que se pueden constituir en interferencias.

En la Tabla 8-6 se resumen los resultados obtenidos de los cuatro lotes de bagazo de *Agave Salmiana*, los extraíbles se reportan en el rango de 8.6 a 18.4%. De acuerdo a la norma T 264 cm-97 y siguiendo rigurosamente el protocolo, el método reporta una desviación de 0.8%. Por esta razón, las diferencias encontradas se pueden asociar a variaciones de la concentración de los extraíbles en las muestras. Comparativamente con la literatura, Baena (2005) reportó que una muestra de bagazo de *Agave Salmiana* de la región de Aqualulco, San Luis Potosí exhibió un contenido de extraíbles de 10%. De forma similar, Saucedo *et al.* (2011) reportaron un contenido de extraíbles de 15.2% para

una muestra de *Agave Salmiana* procedente de Zacatecas, y Abreu *et al.* (2013) reportaron 18.4 % de extraíbles para una muestra de *Agave Salmiana* procedente de Tamaulipas. Estos resultados indican que el porcentaje de extraíbles de los cuatro lotes de bagazo de *Agave Salmiana* disponibles en este trabajo están dentro del rango reportado para una especie similar, de una región geográfica con características muy parecidas a la región de la que procede la variedad usada en este trabajo.

#### **8.4.2. Lignina insoluble en ácido**

La Tabla 8-6 también incluye los resultados obtenidos de los cuatro lotes de bagazo de *Agave Salmiana* para la lignina insoluble en ácido, haciendo notar que el rango de variación de la misma fue en el rango de 8.7 a 15.7%. La desviación estándar reportada por el método para la determinación de lignina fue de 1.9%. La comparación de estos resultados se hizo nuevamente con las referencias bibliográficas disponibles para la misma variedad vegetal y región geográfica similar. El contenido de lignina de 8.15, 10.10 y 14.86%, reportados por Baena (2005), Saucedo *et al.* (2011) y Abreu *et al.* (2013), respectivamente. Con base a esta comparación, los resultados obtenidos con las muestras usadas en este trabajo están todas en el rango y sus diferencias son representativas de una diferente composición de lignina en la muestra. Como se mencionó anteriormente, la lignina proporciona dureza, rigidez y resistencia a la pared celular, así como el transporte de agua, nutrientes y metabolitos (Bergman *et al.*, 2005). En consistencia con estas características, Demirbas (2004) sugirió que un mayor contenido en lignina maximiza los rendimientos de producción del biochar debido a que la lignina también exhibe mayor resistencia a la descomposición térmica (280-500 C).

#### **8.4.3. Celulosa**

Los resultados de celulosa en cada uno de los 4 lotes disponibles se reportan en la Tabla 8-6. La composición de celulosa varió en un rango del 5 %, entre 29.7 a 34.5 %. En este caso, la desviación estándar se reportó en 1.8%. Por su composición, la celulosa resultó el componente mayoritario del bagazo de *Agave Salmiana* seco usada en este trabajo. Se hace notar que la composición de celulosa es muy similar a una de las referencias usadas para comparación, de 37.3 % reportada por Baena (2005). Sin

embargo, la composición de celulosa de las otras muestras fue 8 % menor a los valores reportados por Saucedo *et al.* (2011) y Abreu *et al.* (2013), con valores de 42.0% y 44.2%, respectivamente. De acuerdo con Novak *et al.* (2009), durante la pirólisis, la celulosa se degrada a varios compuestos volátiles, así como vapor de agua, alquitrán, hidrocarburos, ácidos, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO y CO<sub>2</sub>.

#### **8.4.4. Hemicelulosa**

De acuerdo con la Tabla 8-6, la composición de hemicelulosa varió en el rango de 22 - 26% y la desviación estándar para esta determinación fue de 1.7%. En comparación con la literatura, Saucedo *et al.* (2011) y Abreu *et al.* (2013) reportaron contenidos de hemicelulosa similares a los obtenidos con las muestras de estudio (20 y 22.6%, respectivamente), mientras que Baena (2005) reportó un contenido de hemicelulosa significativamente menor (8.2%). De acuerdo con la literatura, cuando la biomasa lignocelulósica se somete a un tratamiento termoquímico, los grupos acetilo y metilo de la hemicelulosa se descomponen para desprender de CO y CO<sub>2</sub> (Rowell 2012).

#### **8.4.5. Cenizas y materia orgánica**

La Tabla 8-6 indica que el contenido de cenizas de los cuatro lotes de bagazo varió en el rango de 13 - 17%, el cuál es prácticamente el doble de la composición de cenizas indicadas por Baena (2005) y Abreu *et al.* (2013), que reportaron un contenido de cenizas de 7.5 y 8.2 %, respectivamente. Las cenizas dan un aproximado del porcentaje de los minerales contenidos en la biomasa. En consecuencia, se puede inferir que la muestra utilizada en este trabajo puede tener mayor contenido metálico con respecto a la misma variedad vegetal de otras regiones geográficas. Por otra parte, Thyrel *et al.* (2013) reportaron que a menor contenido de cenizas en la biomasa se podrán obtener biocombustibles más eficientes. Sin embargo, Demirbas (2004) indicó que un contenido de cenizas mayor al 10% puede resultar benéfico para la producción de biochar con fines agrícolas, debido a la presencia de minerales.

Por otra parte, la materia orgánica es el resultado de los desechos de microorganismos, animales y plantas propios de la biomasa y tiene la función de servir como nutriente. En el análisis de los 4 lotes usados en este trabajo, el rango de materia

orgánica se reportó de 83 - 87 %, que son valores menores en comparación con los reportados en la literatura; Baena (2005) y Abreu *et al.* (2013) reportaron contenido de ceniza de 92.5 y 91.8%, respectivamente.

#### **8.4.6. Resultado de análisis químico de bagazo**

De acuerdo con los resultados del análisis químico de los 4 lotes disponibles en este trabajo, no hubo tendencia aparente para las diferencias observadas en cada caso. Es importante resaltar que la biomasa es una mezcla heterogénea compleja de materia orgánica e inorgánica y su composición depende de varios factores, por lo que se puede inferir que las diferencias de los análisis se pueden asociar a (Richter *et al.*, 2010, Xu *et al.*, 2013, Lam *et al.*, 2014, Kan *et al.*, 2016):

- a) La especie vegetal y la parte de la planta que se analiza.
- b) La edad de la planta.
- c) Las condiciones de crecimiento: luz solar, clima, calidad del agua, pH de suelo, etc.
- d) La distancia de la planta a posibles fuentes de contaminación (carreteras, ciudades, fábricas y mina, etc.).
- e) El tiempo de cosecha y la técnica de recolección.
- f) Las condiciones de transporte y almacenamiento.

Por otra parte, la composición química de la biomasa tiene un efecto en los productos de la pirólisis. Se infiere que un proceso térmico a 300 C puede descomponer los productos primarios de la biomasa, (celulosa y hemicelulosa) en vapores condensables y gas de síntesis. La lignina puede descomponerse en productos sólidos y en menor proporción en líquidos y gases. Los extraíbles pueden generar vapores condensables, mientras que los minerales permanecen en la composición del Biochar (Mohan *et al.*, 2006; Brown, 2009; Brownsort, 2009).

Por esta razón es muy importante el análisis químico de la biomasa, ya que determinan, en conjunto con las condiciones de operación de la pirólisis, la estructura física y el grado de reactividad del biochar (Downie *et al.*, 2009):

- a) *Lignina:*

Un mayor contenido de lignina asegura un mayor rendimiento de biochar, ya que la estructura compleja de la lignina es más difícil de deshidratar, a comparación de celulosa y hemicelulosa. (Warren, 2012). De acuerdo con Mohan *et al.*, (2006) únicamente el 10% del peso original de la lignina se transforma a gases no condensables (CO, CH<sub>4</sub>). La Tabla 8-6 indica que, de los 4 lotes disponibles de biomasa en este trabajo, el lote 1 es el que exhibió una mayor fracción de lignina

*b) Celulosa y Hemicelulosa*

Un mayor contenido de celulosa disminuye el rendimiento de biochar, incrementando el rendimiento de gas de síntesis y bioaceite (Amonette *et al.*, 2009). Esto se debe a que la descomposición de la celulosa produce compuestos orgánicos como aldehídos, cetonas, ácidos carboxílicos y alcoholes (Mohan *et al.*, 2006). Se tiene un efecto similar para la hemicelulosa, cuya descomposición genera gases no condensables (CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>) y compuestos orgánicos como ácidos carboxílicos, aldehídos, alcanos y éteres), así como vapor de agua (Rutherford *et al.*, 2004).

*c) Cenizas:*

Si la materia prima reporta altos contenidos de cenizas, el biochar puede ser afectado por la disminución del contenido de carbono (Gaskin *et al.*, 2008). De esta forma, para la producción de biochar es preferente una menor cantidad de cenizas. Para los cuatro lotes disponibles, la Tabla 8-7 indica que el lote 1 tiene la menor cantidad de cenizas.

Tabla 8-7. Relación de compuestos estructurales del bagazo

	<b>Lote 1</b>	Lote 2	Lote 3	Lote 4
% Lignina / (% Cel + % Hemi)	<b>0.2767</b>	0.2329	0.1973	0.1562
Cenizas (%)	<b>13.29</b>	14.10	16.60	14.47

Con base a la Tabla 8-7, el lote 1 tuvo el mayor contenido de lignina y la menor cantidad de cenizas. Por esta razón, de acuerdo a los objetivos del proyecto, se usó esta muestra para la producción del biochar, tratando de lograr la mayor cantidad de producto.

### 8.5. Análisis químicos de biochar y sustratos comerciales

A continuación, se presentan los resultados del análisis químico del biochar producido en este trabajo y se comparan con los análisis químicos de los sustratos comerciales Peat Moss y fibra de coco. Los resultados de las tres muestras se incluyen en la Tabla 8-8, donde se resume la variabilidad en cada uno de los componentes químicos principales:

- a) Extraíbles: Peat Moss reporta un mayor contenido de extraíbles (5.87%), seguido de biochar (4.13%) y fibra de coco 3.98%).
- b) Lignina insoluble en ácido: Biochar reporta el mayor contenido de lignina (53.64%), seguido de fibra de coco (48.21%) y Peat Moss (38.63%).

De acuerdo a la literatura, el contenido de lignina puede tener algunas implicaciones agronómicas. Huang et al. 2018 reportaron que existe una correlación en el contenido de lignina y el pH del biochar, reflejándose en valores de pH alcalino (7-9), debido a la presencia de grupos funcionales aromáticos y carbonatos. Por otra parte, Rivera *et al.*, (2013) indicaron que sustratos con contenidos mayores al 35% en lignina pueden ser viables para la producción de hongos comestibles del género *Pleurotus ostreatus*.

- c) Celulosa: fibra de coco reporta el mayor contenido de celulosa (25.95%), seguido de biochar (23.85%) y Peat Moss (11.35%).
- d) Hemicelulosa: fibra de coco reporta un mayor contenido de hemicelulosa (20.70%), seguido de Biochar que se reportan en 17.51% y Peat Moss se reporta en 7.37%
- e) Cenizas y materia orgánica: el contenido de cenizas para el biochar se reportan en 6.25%. Para el caso del Peat Moss se reporta en 29.03% y para la fibra de coco en 2.74%.

En el caso de la materia orgánica, para el biochar se reportan en 93.75%. Para el caso del Peat Moss se reporta en 70.97% y para la fibra de coco en 97.26%. El contenido de cenizas está relacionado con el contenido de macro y micro elementos, Vega *et al.*, 2012, establecen un rango de contenido de cenizas de 6.35-8.00%, de acuerdo a su estudio, sustratos comerciales presentaron mayor disponibilidad de micronutrientes como Mn, Fe y Zn, que son requeridos para el crecimiento adecuado de la planta.

Tabla 8-8. Reporte de análisis químico para biochar y sustratos comerciales

<b>Determinación</b>	<b>Biochar</b>	<b>Peat Moss</b>	<b>Fibra de coco</b>
Extraíbles (%)	4.3	5.87	3.98
Lignina (%)	53.64	38.63	48.21
Celulosa (%)	23.85	11.35	25.95
Hemicelulosa (%)	17.51	7.37	20.70
Cenizas (%)	6.25	29.03	2.74
Materia orgánica (%)	93.75	70.97	97.26

### 8.5.1. Comparación de la composición del biochar en función de la composición de bagazo

En la Tabla 8-9 se resumen los análisis químicos del bagazo de agave y Biochar de la muestra de estudio en comparación con la muestra reportada por Cao *et al.*, (2014). La muestra utilizada por los autores corresponde a biomasa proveniente de bambú con un contenido inicial de lignina (23.2%), celulosa (39.9%) y hemicelulosa (26.3%). La biomasa fue sometida a un proceso de pirólisis con una atmosfera inerte de nitrógeno y una temperatura de 900 C. La velocidad de calentamiento fue de 45 C / min y el proceso de pirólisis se mantuvo a 900 C durante 2.0 h. Se obtuvo un Biochar con un contenido de lignina de 48.8%, celulosa 8.3% y hemicelulosa 21.1%. La producción de Biochar se reporta en 20.4% respecto a los otros productos de pirólisis. Comparando resultados obtenidos en ambos estudios:

- a) Lignina: en ambos casos se observa que el contenido de lignina aumenta de biomasa a Biochar, para el caso de Cao *et al.*, (2014) la proporción aumenta 1:2, mientras que la muestra de estudio aumenta en una relación 1:3.
- b) Celulosa: el porcentaje de conversión para celulosa para Cao *et al.*, (2014) es de 79.2% mientras que para la muestra de estudio es del 28.51%. En este caso se puede notar que hubo una mayor conversión de celulosa, que puede estar influenciada por las temperaturas de tratamiento térmico.

- c) Hemicelulosa: porcentaje de conversión de hemicelulosa para Cao *et al.*, (2014) es de 19.78% mientras que para la muestra de estudio es de 28.51%. El porcentaje de conversión para cada componente se calcula de acuerdo a la ecuación 8-1.

$$\%conversión = 100 - \frac{\%componente\ principal_{biochar}}{\%componente\ principal_{biomasa}} \quad 8-1$$

Los efectos de conversión se pueden explicar de acuerdo a Gómez *et al.*, (2008) que establece que en los procesos de pirólisis de biomasa el primer componente que reaccionan es la hemicelulosa, por ser la más inestable térmicamente, seguida de la celulosa, la cual es el mayor componente en peso de la biomasa y finalmente la lignina.

Tabla 8-9. Análisis químico de Biochar

	Cao <i>et al.</i> , (2014)			Muestra de estudio		
	Biomasa Bambú	Biochar	Conversión	Biomasa Bagazo	Biochar	Conversión
Lignina %	23.2	48.8	N.D	15.69	53.64	N.D
Celulosa %	39.9	8.3	79.2	33.39	23.85	28.51
Hemicelulosa %	26.3	21.1	19.78	23.31	17.51	24.89

N.D: no determinado

### 8.5.2. Análisis del contenido metálico de bagazo, biochar y sustratos comerciales

El reporte del contenido metálico se presenta en la Tabla 8-10 y se clasifica en:

- a) Metales pesados:

La presencia de metales con cadmio (Cd) y plomo (Pb) pueden tener efectos negativos en el desarrollo de una especie vegetal, inhibiendo el crecimiento en raíces o en el resto de los órganos, así como fallas estructurales y aparición de especies reactivas de oxígeno (ROS) que producen estrés oxidativo (Cobbett, 2002). De acuerdo a la NOM-021-SEMARNAT, los valores sugeridos de elementos tóxicos en el suelo, según la tolerancia de los cultivos son para el Cd un rango entre 3 – 5 ppm y para el caso de Pb entre 100 – 300 ppm. El análisis realizado a la muestra de bagazo reporta que no tiene

metales pesados, por esta razón, se considera que la materia prima es adecuada para su transformación a biochar mediante pirólisis.

Por otra parte, la muestra de biochar no presenta contenidos de metales pesados como Pb, Se y Cd, a diferencia del caso de Peat Moss donde se detectan 35.95 ppm de Cr. La presencia de cromo afecta en la germinación de las semillas, retrasando la actividad enzimática (amilasa, proteasa y ribonucleasa) por lo tanto reduciendo la productividad de la planta. Es importante hacer notar que la concentración Cr en un sustrato no deberá de ser mayor a 20 ppm (Marinova, 2009).

b) Cationes básicos y ácidos:

Metales como el calcio (Ca) y magnesio (Mg) se consideran elementos nutritivos en el suelo, necesarios para asegurar el crecimiento y desarrollo de la planta. De acuerdo al análisis, la muestra contiene 8.42% de calcio, comparado con la literatura, Heredia *et al.*, (2014) reportan un contenido de 3.46% para una muestra de *Agave Salmiana* procedente de Zacatecas. De acuerdo con los autores, esta concentración de Ca es suficiente para la aplicación del bagazo de agave (de manera directa) como aditivo de suelos. De acuerdo a los resultados de la Tabla 8-10, para el Biochar se encontró un contenido de Ca de 5.86%, en comparación de Peat Moss que presentó un contenido menor (3.58%). De acuerdo con la literatura, la deficiencia de Ca es importante en concentraciones menores de 0.40-0.60%. Los requerimientos por Mn de la mayoría de las especies vegetales se encuentran entre 20 y 40 ppm, las reacciones de toxicidad resultan cuando los tejidos acumulan concentraciones mayores de 200 ppm, de acuerdo a los resultados obtenidos Biochar (0.4%) y Peat Moss (1.17) se encuentran por debajo de los requerimientos. La concentración de Na recomendada para un sustrato deberá de ser < 40 ppm, tanto el Biochar (0.11%) como Peat Moss (0.1%) se encuentran dentro del parámetro (Chen Lopez, 2018, Haslett *et al.*, 2001).

Por otra parte, metales como el aluminio (Al), sirven como base de intercambio que mediante un proceso de hidrólisis tienen la capacidad de regular el pH del suelo, permitiendo la disponibilidad de los micronutrientes. FAO (<http://www.fao.org/tempref/docrep/fao/010/a1374s/a1374s03.pdf>), establece los siguientes rangos de concentración para Al en suelo para el cultivo de tomate: un rango

menor a 135 ppm se considera deficientes, concentraciones entre 144 y 270 ppm se considera óptimo, concentraciones mayores a 270 ppm, se consideran elevados. La concentración del biochar se reporta en 57.55 ppm y para el Peat Moss en 0.81 ppm

c) Micronutrientes:

Metales como el cobre (Cu) y hierro (Fe) son requeridos para completar el ciclo vital de la especie vegetal, se requieren a niveles traza (concentraciones inferiores a los 1000 ppm); el exceso de estos micronutrientes podría volverse tóxicos, a excepción del Fe que generalmente se encuentra en altas concentraciones de acuerdo a la NOM-021-SEMARNAT-2000, el contenido de hierro deberá estar presente en concentraciones mayores que 4.5 ppm. En el análisis de la muestra de bagazo se encontró un contenido de hierro 85.78 ppm, en comparación con la literatura Heredia *et al.*, (2014) reportan un contenido de 79.1 ppm, para una muestra de *Agave Salmiana* procedente de Zacatecas. De acuerdo con estos autores el hierro se puede aprovechar para proveer de los requerimientos de algunas especies de hongos como *P. ostreatus*.

Para mejorar el estado nutricional de la planta es conveniente conocer la disponibilidad de micronutrientes, por lo tanto es necesario cuidar que la relación de Fe:Mn sea de 2:1. Sin embargo, en el caso del biochar la relación Fe:Mn fue 22:1. En el caso del Peat Moss, la relación Fe:Mn fue menor a la unidad. Para el caso de Zn se consideran concentraciones toxica por encima de 35 ppm (Haslett *et al.*, 2001). En el caso del biochar la concentración de Zn fue 15.74 ppm, en el rango donde el Zn es inocuo.

La presencia de micro y macronutrientes es importante para la regulación nutricional de las especies vegetales. Además, son de suma importancia para la adquisición de carbono y la producción de energía (Antal *et al.*, 2003). De acuerdo al análisis químico, el bagazo de agave tiene los requerimientos de micro y macronutrientes como Ca, Fe, Mn, Na, que de preservarse después de transformación a biochar, pueden tener los siguientes beneficios (Hoshi, 2001):

- a) Será proveedor de nutrientes de manera directa.
- b) Permitirá el ahorro de nutrientes (en términos de fertilizantes).

Tabla 8-10. Reporte del contenido metálico presente en el bagazo de agave

Clasificación	Metal	Bagazo (este trabajo)	Heredia <i>et al.</i> , (2014)	Biochar (este trabajo)	Peat Moss (este trabajo)
<b>Metales pesados (ppm)</b>	As	ND	N.R	ND	ND
	Ba	<b>12.29</b>		<b>25.5</b>	13.37
	Cd	ND		<0.05	<0.05
	Cr	2.09		0.85	<b>35.95</b>
	Ag	5.65		0.35	2.69
	Pb	ND		ND	ND
	Se	ND		ND	ND
<b>Catión básico (%)</b>	Ca	8.42	3.46	5.86	3.58
	Mg	0.48	0.12	0.4	1.17
	Na	0.13	N.R	0.11	0.1
	K	0.59	0.43	1.05	0.37
<b>Catión ácido (ppm)</b>	Al	49.47	N.R	57.55	0.81
<b>Micronutrientes (ppm)</b>	B	18.6	N.R	24.44	11.33
	Cu	4.01	N.R	9.93	14.15
	Fe	<b>85.78</b>	79.1	<b>221.35</b>	0.38
	Mn	<b>4.99</b>	8.16	<b>9.62</b>	<b>47.76</b>
	Zn	5.03	38.5	15.74	<b>22.46</b>

ND: no detectado

NR: no reportado

De acuerdo a Antal *et al.*, 2003 se debe tener en cuenta que el contenido de metales puede aumentar el rendimiento de biochar hasta un 15%. Sin embargo, se debe de tener cuidado ya que la posible adicción de minerales a las materias primas puede traer efectos negativos en la estructura y fertilidad del suelo, el crecimiento de las plantas, así como el costo del suministro de estos nutrientes si estos vienen de otros medios. Por otra parte, en caso de que el sustrato presente deficiencia en algunos minerales, estos se pueden añadir antes del proceso termoquímico para completar los valores requeridos.

De acuerdo a la discusión anterior, el biochar puede resultar adecuado para su aplicación agrícola como sustrato, ya que tiene presente en cantidades apropiadas la mayoría de los metales requeridos para una especie vegetal. Por lo tanto, el biochar será aplicado de manera directa las pruebas funcionales, es decir sin la aplicación de fertilizantes y soluciones nutritivas.

### **8.6. Análisis por descomposición por temperatura programada**

Como aspectos operativos importantes de los análisis por descomposición por temperatura programada se hace notar los siguientes:

- a) El tratamiento térmico de las muestras no solo descompone las muestras para formar gas y sólido, sino que también se forma cierta cantidad de líquido. Esta situación hace que el proceso de limpieza del reactor sea un reto, de forma que no haya interferencias para el siguiente análisis. De esta forma, el lavado del reactor tubular de cuarzo se debe hacer con agua regia, durante 1 h, en presencia de ultrasonido. Después de enjuagar el reactor se hace un segundo lavado con agua y acetona, durante 30 min, en presencia de ultrasonido. Finalmente, el reactor se seca a 120 C durante 2 h.
- b) Lo ideal es cuantificar los productos en línea de forma cuantitativa, usando un cromatógrafo de gases. A este respecto, la situación es que algunos productos, por su naturaleza y concentración se llevan un tiempo notorio para salir de la columna cromatográfica. A pesar de una optimización preliminar del programa de temperatura del cromatógrafo, el tiempo de retención estimado es de 9 a 10 min, lo que hace inviable seguir apropiadamente la cuantificación de los productos que están siendo descompuestos térmicamente. Esto se debe a que la rampa de calentamiento es de 10 C/min; de esta forma, en 10 min ya hubo un incremento de temperatura en el reactor de 100 C. Medir la composición cada 100° hace que los datos sean insuficientes para seguir apropiadamente el patrón de descomposición. Por esta razón, en esta etapa del proyecto solo se hizo una cuantificación cualitativa con un detector que mide la señal de todos los compuestos que están siendo descompuestos en cada tiempo/temperatura en el reactor.

La Figura 8-12 muestra el perfil de la señal asociada a los compuestos formados durante el tratamiento térmico de las muestras de bagazo de agave, biochar y Peat Moss. Para simplificar el análisis, estos perfiles se pueden dividir en 2 zonas principales, definidas

por la aparición de dos señales claramente diferenciadas. La zona A se ubicó en el rango de temperatura donde aparece la primera señal, entre 250 y 350 °C. En este rango de temperatura ocurre la descomposición de la muestra, caracterizada por la producción de gases CO<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>O y la carbonización de la muestra, probablemente asociado a la despolimerización de la celulosa y hemicelulosa por efecto de la temperatura. (Gomez *et al.*, 2005). En principio, debe existir una relación entre el contenido de cada uno de los componentes presentes en la biomasa y la producción de gases volátiles, que se deberá validar cuando se realicen los análisis cuantitativos de los gases. Posteriormente, se ubicó la Zona B, en el rango de 375 y 450 °C. Esta señal se asoció inicialmente a la descomposición de la lignina y, de acuerdo con la literatura, debe generar vapores de compuestos oxigenados primarios, originando que la muestra residual tenga un mayor porcentaje de carbonización. Se hace notar que en el caso del bagazo y el biochar apareció una señal alrededor de 600 °C, que puede estar asociada a la formación de hidrocarburos livianos aromáticos y oxigenados, que son los precursores del bioaceite (Gomez *et al.*, 2005).

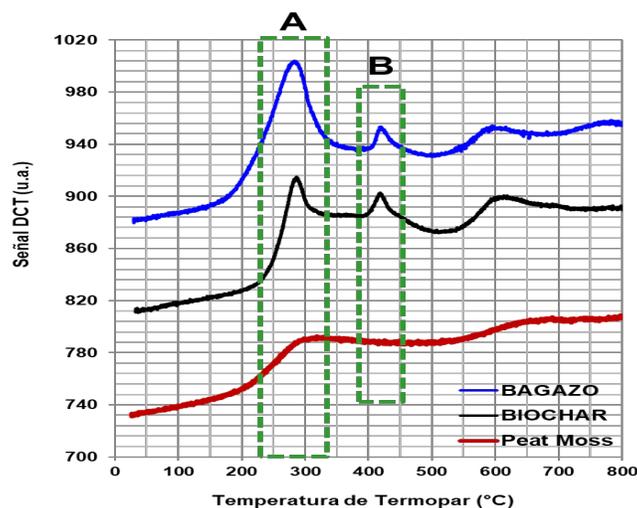


Figura 8-12. Termograma de bagazo de *Agave Salmiana*, biochar y Peat Moss.

Es importante hacer notar que la intensidad de las señales y más precisamente, el área bajo la curva de la señal, es una medida proporcional a la cantidad de compuestos químicos que le dieron origen en la muestra que se analiza. De forma cualitativa, los termogramas de la Figura 8-11 sugieren que la muestra de bagazo de *Agave Salmiana* tiene mayor contenido de celulosa y hemicelulosa que la muestra de biochar. De hecho,

dado que el biochar es una muestra generada del tratamiento de bagazo a 350 C, la diferencia de la señal A para el biochar y el bagazo corresponde a la proporción de celulosa y hemicelulosa que no fueron removidas del bagazo por el tratamiento a 350 C. Estos resultados se pueden sustentar por la señal que se midió en el rango de 375 - 450 C. Si el bagazo solo se trató térmicamente a 350 C, entonces no debió haber descomposición de la lignina en la muestra y, en consecuencia, la señal correspondiente al biochar debería ser muy similar. Los resultados para el biochar y bagazo documentan que las señales son muy similares, corroborando la hipótesis propuesta. La señal a 375 - 450 C corresponde a lignina y el tratamiento térmico inicial del biochar a 350 C, no descompuso la lignina presente en el bagazo. Un resultado similar se puede argumentar para la señal alrededor de 600 C, que se asoció preliminarmente a la descomposición de los precursores del aceite.

Complementariamente, los resultados de una serie de muestras gaseosas de la descomposición de biochar durante la pirólisis a 350 C, sugieren que la composición relativa de gases incondensables como O<sub>2</sub>, CO y CO<sub>2</sub> cambia en función de la temperatura a la cual se colecta la muestra de gas. Esta situación deja el precedente que un análisis cuantitativo de la muestra de gas en función de la temperatura se podrá correlacionar con la estequiometría de compuestos como la celulosa y hemicelulosa y utilizar entonces los resultados de la caracterización por TPD para determinar la composición química de las muestras.

La relevancia de los resultados de TPD, a la fecha, es que validan cualitativamente que las condiciones de medición por esta técnica son cualitativamente similares a los que se obtendrían en el pirolizador. De esta forma, el uso de una menor cantidad de muestra y de una simplificación en la operación, dan la pauta para optimizar las condiciones de operación que deben prevalecer en el pirolizador, con un ahorro de materia prima, tiempo y recursos económicos.

### **8.7. Pruebas funcionales**

En la Figura 8-13 se muestra, como un primer resultado de la evaluación del potencial agronómico del biochar, la comparación del crecimiento de las plántulas de jitomate utilizando biochar como sustrato al 100% y el Peat Moss al 100%, como control. En el caso del Peat Moss al 100%, solo 13 de las semillas fueron viables y la germinación

se presentó a los 4 días. Dentro de los primeros 30 días, el crecimiento de la plántula de jitomate en el Peat Moss se comportó de forma normal con respecto a lo reportado en la literatura para el sustrato comercial. En el caso de biochar, las 15 semillas sembradas fueron viables; sin embargo, la germinación de las semillas se presentó hasta después de 15 días. El retraso observado en la germinación con respecto al sustrato comercial se mantuvo durante los 45 días de monitoreo.

Es importante distinguir la diferencia entre viabilidad y vigor. Por un lado, la viabilidad se refiere a la capacidad de una semilla de germinar en condiciones óptimas y determina el potencial verdadero de germinación en laboratorio. Por otra parte, el vigor distingue los mejores lotes de semillas, aquellos que tienen una germinación rápida y uniforme, y que pueden producir una plántula normal en un rango amplio de condiciones ambientales. Para un productor de trasplantes, el vigor de un lote de semillas determina el % de producción de trasplantes (Leskovar, 2001). En los experimentos, la producción obtenida con la formulación S100 (100% PeatMoss) es 87%, mientras que para la formulación S0 (100% Biochar) es 100%.

Una vez evaluado cada uno de los materiales al 100%, se propone la evaluación de las mezclas, sustrato-biochar para validar la influencia del biochar en el desarrollo de las plántulas con el objetivo de proponer un sustituto para los sustratos comerciales y en etapas posteriores determinar la relación costo beneficio de cada una de las mezclas de acuerdo al crecimiento del tomate. El estudio realizado arrojó que en ninguna de las formulaciones se observó un efecto negativo sobre la germinación de las semillas, lo que indica que el Biochar sintetizado no presenta compuestos tóxicos para la especie vegetal. Los datos obtenidos para cada variable agronómica, respecto a cada una de las formulaciones preparadas para las pruebas funcionales se reporta a continuación.

a) Evaluación a 30 días



b) Evaluación a 45 días



Figura 8-13. Monitoreo fotográfico de la plántula.

### 8.7.1.1. Altura de plántula

La Figura 8-14 muestra los datos y el análisis estadístico de los mismos, para la altura de las plántulas de tomates híbridos medida a los días 15, 30 y 45. En cada medición, se tomaron 5 plántulas de cada mezcla, en. La figura incluye también (barra azul) el tratamiento del control que fue el sustrato comercial Peat Moss al 100%. De la figura 8-14 son evidentes los siguientes resultados:

- a) A los 15 días, con respecto al control S100, no hubo diferencia estadística para las muestras S75 y S50.
- b) A los 30 días, con respecto al control S100, no hubo diferencia estadística para la muestra S75.
- c) A los 45 días, con respecto al control S100, no hubo diferencia estadística para la muestra S75.

Con base al análisis de varianza, se puede establecer que las formulaciones S25 y S50 tienen un efecto significativo sobre el crecimiento de la plántula, ya que el análisis demostró que no existe diferencia significativa ( $p < 0.05$ ) entre estas formulaciones y el control S100. El estudio para las formulaciones S75 y S100, durante los 45 días de observación, indicó que estas muestras no tuvieron efectos favorables para el desarrollo de las plántulas de tomate. Sin embargo, el retraso de 15 días observado en la germinación puede ser un aspecto favorable para otras aplicaciones agrícolas.

a)

Altura de plántula mm			
Formulación de la mezcla	15 días	30 días	45 días
S100	47.76	82.07	91.17
S75	38.06	55.18	71.77
S50	25.17	40.82	50.88
S25	0.00	25.35	32.07
S0	0.00	24.05	26.00

b)

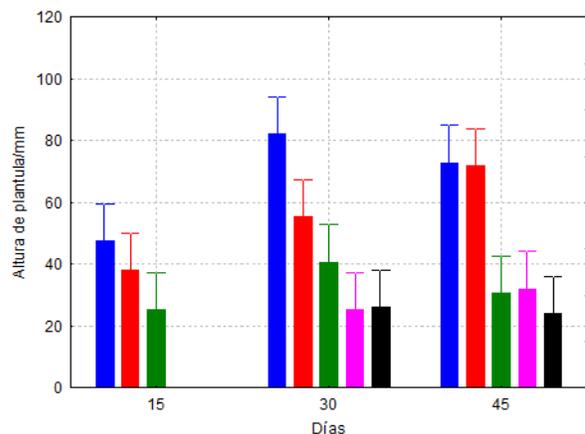


Figura 8-14. Altura de plántula. a) Datos. b) Análisis por tratamiento

### 8.7.1.2. Diámetro de tallo

La Figura 8-15 muestra la representación gráfica de los datos obtenidos respecto a las mediciones obtenidas respecto al diámetro del tallo, los datos se tomaron por periodos en 5 muestras distintas a los 15, 30 y 45 días en plántulas de tomates híbridos. En la barra azul se presenta el tratamiento del control, (Peat Moss 100%) y se realizaron comparaciones respecto a las otras formulaciones. De acuerdo al análisis de varianza, se tienen las siguientes observaciones:

- a) 15 días: respecto al control S100, no hay diferencia estadística entre S75 y S50.
- b) 30 días: respecto al control S100, no hay diferencia estadística entre S75.
- c) 45 días: respecto al control S100, no hay diferencia estadística entre S75.

Estos resultados obtenidos nos demuestran que las plántulas de tomate con los tratamientos S100 y S75 tuvieron un mayor desarrollo en el diámetro del tallo, entre ambas formulaciones no existe diferencia significativa ( $p < 0.05$ ).

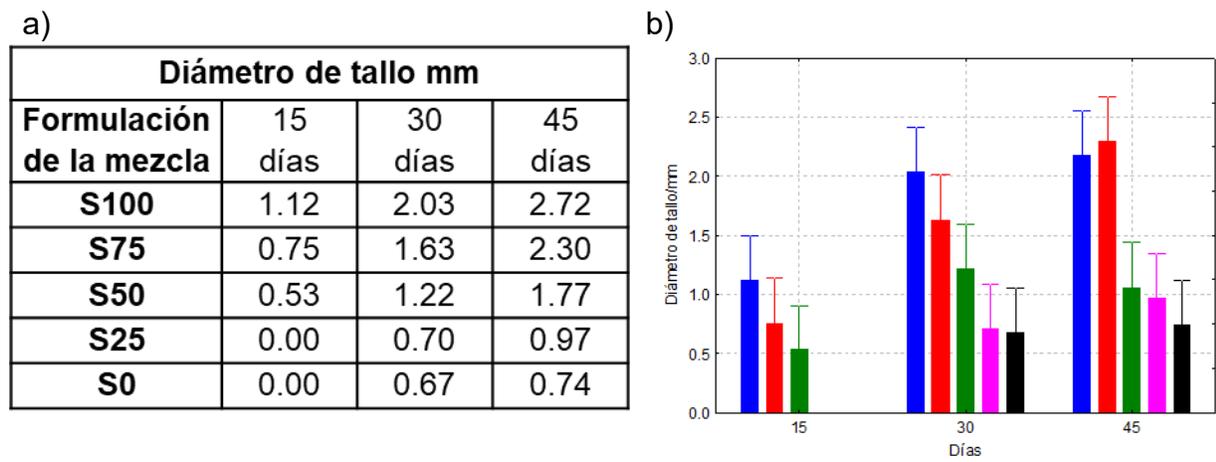


Figura 8-15. Diámetro de tallo. a) Datos. b) Análisis por tratamiento

### 8.7.1.3. Longitud hojas verdaderas

La Figura 8-16 muestra la representación gráfica de los datos obtenidos respecto a las mediciones obtenidas de la longitud de hojas verdaderas, los datos se tomaron por periodos en 5 muestras distintas a los 15, 30 y 45 días en plántulas de tomates híbridos. En la barra azul se presenta el tratamiento del control, (Peat Moss 100%) y se realizaron comparaciones respecto a las otras formulaciones. De acuerdo al análisis de varianza, se tienen las siguientes observaciones:

- a) 15 días: las hojas verdaderas solo se presentaron en las formulaciones S75 y S100 y no existe diferencia estadística entre ellas.
- b) 30 días: las hojas verdaderas se pueden observar en las formulaciones S25, S50, S75 y S100.  
No se observan diferencias estadísticas entre S75 y S100.
- c) 45 días: las hojas verdaderas se pueden observar en todas las formulaciones. Sin embargo hay una diferencia de crecimiento importante entre S0 y S100. Respecto al control S100, no hay diferencia estadística entre S75, S50, S25. Estos resultados nos demuestran que existe un efecto positivo en el crecimiento de las plántulas en las formulaciones S25 y S50.

a)

Longitud de hojas mm			
Formulación de la mezcla	15 días	30 días	45 días
S100	17.22	28.43	30.51
S75	8.90	21.70	25.16
S50	0.00	16.53	22.79
S25	0.00	2.29	13.50
S0	0.00	0.00	11.07

b)

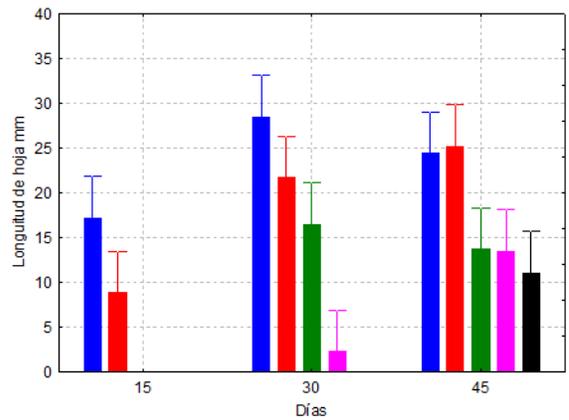


Figura 8-16. Longitud de hojas verdaderas. a) Datos. b) Análisis por tratamiento

#### 8.7.1.4. Longitud de raíz

La Figura 8-17 muestra la representación gráfica de los datos obtenidos respecto a las mediciones obtenidas de la longitud de raíz, los datos se tomaron por periodos en 5 muestras distintas a los 15, 30 y 45 días en plántulas de tomates híbridos. En la barra azul se presenta el tratamiento del control, (Peat Moss 100%) y se realizaron comparaciones respecto a las otras formulaciones. De acuerdo al análisis de varianza, se tienen las siguientes observaciones:

- a) 15 días: la longitud de la raíz respecto al control S100, no hay diferencia estadística entre S75, S50. No se tienen aún muestras para medición de las formulaciones S25 y S0.

- b) 30 días: se cuentan con muestras para la medición en todas las formulaciones. Respecto al control S100, hay diferencia estadística entre S75, S50, S25 y S0.
- c) 45 días respecto al control S100, no hay diferencia estadística entre S75, estos resultados probablemente se den por el parecido en pH y conductividad de las mezclas. Para las formulaciones S50, S25 y S0, el control es mayor en la longitud de raíz.

a)

Longitud de raíz mm			
Formulación de la mezcla	15 días	30 días	45 días
S100	47.11	230.20	136.15
S75	69.04	118.50	125.50
S50	20.20	105.60	105.14
S25	0.00	52.20	67.80
S0	0.00	26.20	82.69

b)

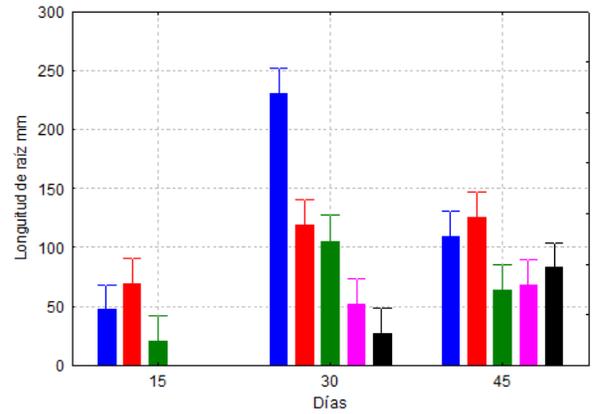


Figura 8-17. Longitud de raíz. a) Datos. b) Análisis por tratamiento

### 8.7.1.5. Peso fresco

La Figura 8-18 muestra la representación gráfica de los datos obtenidos respecto a las mediciones obtenidas del peso fresco, los datos se tomaron por periodos en 5 muestras distintas a los 15, 30 y 45 días en plántulas de tomates híbridos. En la barra azul se presenta el tratamiento del control, (Peat Moss 100%) y se realizaron comparaciones respecto a las otras formulaciones. De acuerdo al análisis de varianza, se tienen las siguientes observaciones:

- a) 15 días: respecto al control S100, no hay diferencia estadística entre S75 y S50.
- b) 30 días: respecto al control S100, no hay diferencia estadística entre S75.
- c) 45 días: respecto al control S100, no hay diferencia estadística entre S75.

a)

Peso fresco g			
Formulación de la mezcla	15 días	30 días	45 días
S100	0.19	1.74	2.13
S75	0.15	1.05	2.00
S50	0.03	0.40	0.89
S25	0.00	0.06	0.18
S0	0.00	0.05	0.13

b)

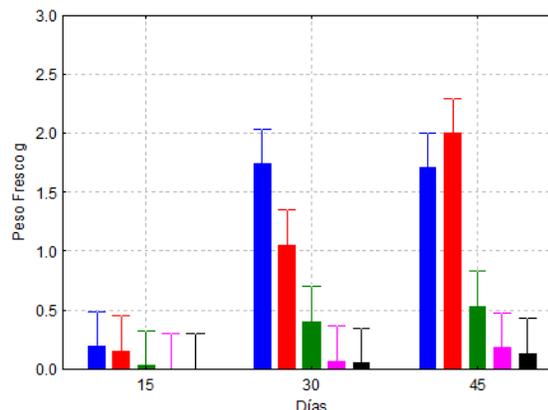


Figura 8-18. Peso fresco. a) Datos. b) Análisis por tratamiento

### 8.7.1.6. Peso seco

La Figura 8-19 muestra la representación gráfica de los datos obtenidos respecto a las mediciones obtenidas del peso seco, los datos se tomaron por periodos en 5 muestras distintas a los 15, 30 y 45 días en plántulas de tomates híbridos. En la barra azul se presenta el tratamiento del control, (Peat Moss 100%) y se realizaron comparaciones respecto a las otras formulaciones. De acuerdo al análisis de varianza, se tienen las siguientes observaciones:

- a) El peso seco a los 15 días, en la formulación S50 presentó un incremento menor respecto al control. No hay diferencia estadística entre S100 y S75. Para las formulaciones S25 y S0, aún no se contaba con muestra para la toma de parámetros.
- b) El peso seco a los 30 días respecto al control S100, no hay diferencia estadística entre S75.
- c) El peso seco a los 45 días no presenta diferencias estadísticas entre las formulaciones S75 y S100. Aunque las formulaciones S25 y S0 presentan un aumento en peso, no es suficiente para igualar al control.

### 8.7.1.7. Biomasa

La figura 8-20 muestra la representación gráfica de los datos obtenidos respecto a las mediciones obtenidas de biomasa, los datos se tomaron por periodos en 5 muestras distintas a los 15, 30 y 45 días en plántulas de tomates híbridos. En la barra azul se

presenta el tratamiento del control, (Peat Moss 100%) y se realizaron comparaciones respecto a las otras formulaciones

a)

Peso seco g			
Formulación de la mezcla	15 días	30 días	45 días
S100	0.023	0.209	0.279
S75	0.032	0.127	0.251
S50	0.005	0.041	0.120
S25	0.000	0.009	0.027
S0	0.000	0.007	0.022

b)

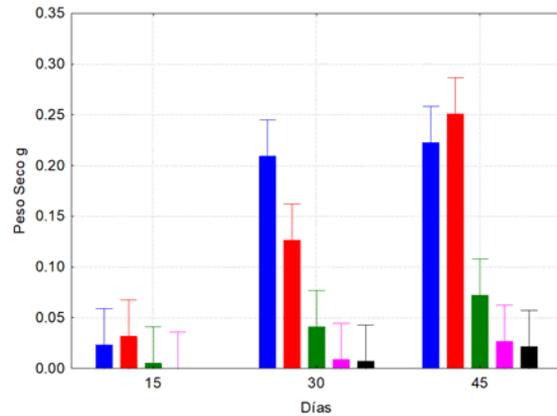


Figura 8-19. Peso seco. a) Datos. b) Análisis por tratamiento

De acuerdo al análisis de varianza, se tienen las siguientes observaciones:

- a) 15 días: no se cuentan con muestras para las formulaciones S0 y S25. Respecto al control S100, no hay diferencia estadística entre S75 y S50.
- b) 30 días: respecto al control S100, no hay diferencia estadística entre S75, S50, S25 y S0.
- c) 45 días: no se presenta diferencia estadística en las formulaciones S75, S50, S25 y S0, respecto al control S100.

a)

Biomasa			
Formulación de la mezcla	15 días	30 días	45 días
S100	8.29	8.27	7.65
S75	4.95	8.33	7.91
S50	5.37	9.91	7.40
S25	0.00	7.07	6.70
S0	0.00	6.39	6.12

b)

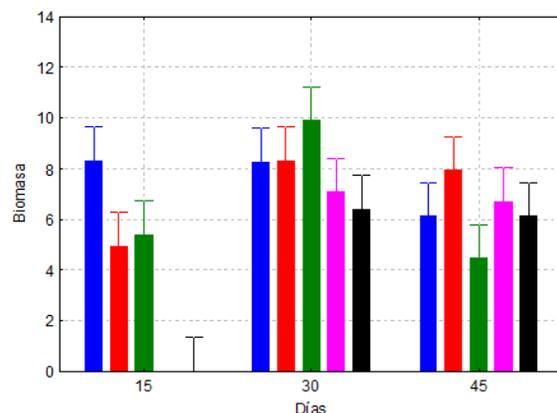


Figura 8-20. Biomasa. a) Datos. b) Análisis por tratamiento

### 8.7.1.8. Fluorescencia de clorofila

Como se indicó, los parámetros que se obtienen en la medición de la fluorescencia de clorofila usando el Analizador de Rendimiento de Fotosíntesis de MINI-PAM son  $F_v/F_m$  y  $Y(II)$ , los cuales estiman la fracción de cuantos absorbidos utilizados para la fotoquímica de PS II. Es importante hacer notar que  $Y(II)$  corresponde a “la eficiencia” que se alcanza en el proceso de fotosíntesis de la plántula que está siendo medida. Experimentalmente se espera que el valor de  $Y(II)$  de encuentre en un rango de 0 a 0.84 unidades (*Manual and Documentation. Instruction Manual for MINI-PAM-II*).

La tabla 8-11 incluye los resultados de  $Y(II)$  para cada una de las formulaciones de las mezclas de sustratos biochar - Peat Moss. Los resultados incluidos corresponden al promedio de tres pulsaciones aplicadas a la hoja verdadera en plántulas de tomate, para cada una de las formulaciones de las mezclas de sustrato a los 15, 30 y 45 días después de germinación.

Tabla 8-11. Resultados de Fluorescencia de la clorofila por formulación

Formulación de la mezcla	Y(II)		
	15 días	30 días	45 días
S100	0.76	0.66	0.54
S75	0.76	0.71	0.66
S50	0.00	0.61	0.63
S25	0.00	0.00	0.48
S0	0.00	0.00	0.46

Para facilitar el análisis inicial de estos resultados de la tabla 8-11, los mismos se han graficado de dos diferentes formas, mostradas en la figura 8-21.

Como se indica en la figura 8-21 a), para las formulaciones S100 y S75 se obtuvo respuesta a la prueba de fluorescencia de la clorofila después de los primeros 15 días de germinación. En ambos casos, los valores de  $Y(II)$  fueron de 0.76. Para la formulación S50 se tuvo apreciación de hojas verdaderas a los 30 días, y para las formulaciones S25 y S0 solo hasta 45 días después de germinación. Por esta razón, los valores de  $Y(II)$  aparecen inicialmente a 30 días después de germinación para S50, y a 45 días después

de germinación para S25 y S0. Adicionalmente, el primer valor para Y(II) de la formulación S50 fue 0.61, el cual es notoriamente menor que el valor de 0.76 obtenido inicialmente para las formulaciones S100 y S75. De forma similar, para las formulaciones S25 y S0, el primer valor para Y(II) fue de 0.48 y 0.46, respectivamente. Nuevamente, estos resultados de Y(II) fueron menores que el obtenido inicialmente para las formulaciones S100, S75 y S50.

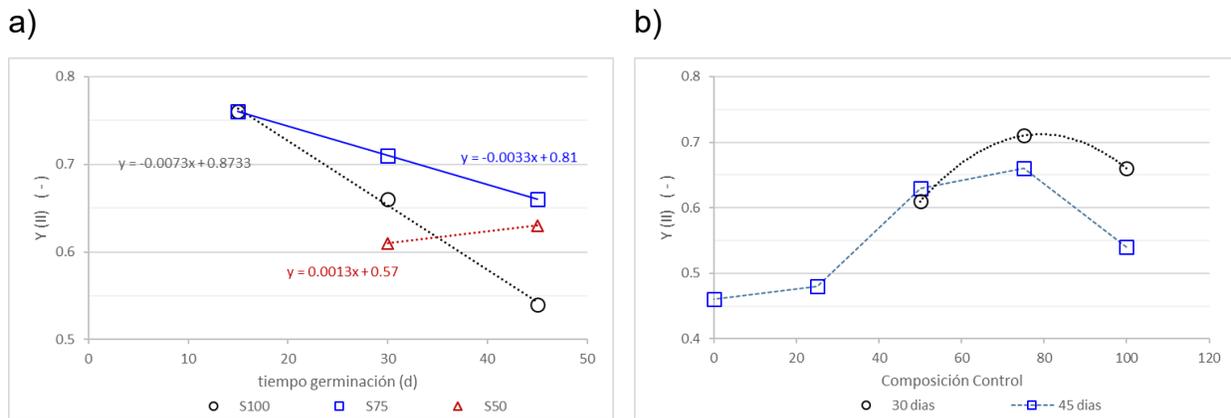


Figura 8-21. Representación gráfica para análisis inicial de los resultados de Y(II).

Complementariamente, se hace notar que para el control (S100), la disminución de Y(II) fue prácticamente lineal con respecto con el tiempo de crecimiento. Una variación similar de Y(II) se observó también para la formulación S75. Aunque ambas formulaciones (S100 y S75) presenten la misma variación de Y(II) con respecto al tiempo de crecimiento, fue notorio que el decaimiento de Y(II) fue mayor para S100, ya que disminuyó de 0.76 a 0.54, a diferencia de S75, en el que Y(II) disminuyó de 0.76 a 0.66. Esta diferencia puede sugerir que la plántula de tomate está sometida a un mayor estrés en el caso de la formulación S100 que en el caso de S75.

Para las otras formulaciones no se tienen observaciones concluyentes dado que la medición de Y(II) solo se pudo realizar en dos tiempos de muestreo para S50 y en un solo tiempo de muestreo para S25 y S0. Para la formulación S50 se encontró que Y(II) aumentó de 0.61 a los 30 días a 0.63 a los 45 días. Esta tendencia es contraria a la observada para las formulaciones S75 y S100. No se tiene una conclusión sobre este comportamiento y se considera necesario contrastar estos resultados con los de otros

parámetros morfofisiológicos, ya que se podría sugerir que la plántula aun no presenta su máximo de crecimiento.

Como se indicó,  $Y(II)$  es una medida de la eficiencia del uso de la luz para los procesos fotosintéticos; en consecuencia, un mayor valor de  $Y(II)$  es el reflejo de que la plántula tiene mayor potencial para su crecimiento. En el enfoque usado en este trabajo, los valores de  $Y(II)$  pueden indicar indirectamente el efecto que tiene la formulación del sustrato en un mayor rendimiento fotosintético de la planta que repercute en mejores condiciones para su crecimiento. El efecto de la formulación de la mezcla de sustrato se debe a que cada formulación tiene diferentes propiedades de mezcla en términos de cantidad de carbono, tipo y concentración de nutrientes, pH de mezcla, porosidad y disponibilidad de agua; se ha reportado que estos parámetros determinan el estrés al que está sometida la planta y por lo tanto condicionan el valor de  $Y(II)$  (Maxwell *et al.*, 2000; Huang, 2004). De acuerdo con este marco de referencia, los resultados de la figura 2 a) sugieren que las plántulas de la formulación S100 están sometidas a un mayor estrés a diferencia de las plántulas de S75.

Por otra parte, la figura 8-21 b), ilustra la variación de  $Y(II)$  para cada formulación para los tiempos de germinación de 45 días (donde ya había plántulas de jitomate para todas las formulaciones de mezclas) y para 30 días (donde había plántulas para las formulaciones S100, S75 y S50) en función de tiempo de germinación. No se muestran los resultados a 15 días después de germinación debido a que a este tiempo solo hubo plántulas para las formulaciones S100 y S75.

Los resultados a los 45 días (curva azul) mostraron que  $Y(II)$  se incrementó con el contenido de Peat Moss en la formulación de la mezcla hasta un 75% y, posteriormente, hubo un decremento en  $Y(II)$  para el caso de la muestra control (100 % de Peat Moss). Los resultados para  $Y(II)$  medidos a los 30 días mostraron una tendencia similar para los datos disponibles. Es decir, el máximo valor de  $Y(II)$  se encontró para la formulación de S75, que contiene 75% en peso de Peat Moss y 25% de biochar. En una primera instancia estos resultados parecen sugerir que el uso de biochar tiene una aportación benéfica en el desarrollo de las plántulas, ya que a 30 y 45 días la formulación S100 presentó menores valores de  $Y(II)$ . A este respecto, como se esquematiza en la figura 8-22 y 8-23, las hojas de la formulación S100 a los 45 días presentaron una visible coloración amarilla y su raíz

fue menos abundante que la correspondiente a la formulación S75. Estas observaciones son consistentes con un menor valor de  $Y(II)$  para la formulación S100.



Figura 8-22. Hojas de plántulas de la formulación S100 a los 45 días



Figura 8-23. Diferencia de crecimiento de raíz en las formulaciones S100 y S75 a los 45 días

Para el estudio estadístico y con los resultados de Y(II) disponibles para cada mezcla a los 15, 30 y 45 días de germinación, se realizó un análisis de ANOVA con el objetivo de identificar si las diferencias en el desarrollo de las plántulas en cada mezcla y tiempo de germinación, determinado a partir de Y(II), fueron estadísticamente significativas. El análisis de ANOVA se hizo con un nivel de confianza del 95% y una tasa de error por parámetro evaluado de 0.05, que se aplicó a la medición directa de Y(II) (es decir, al resultado de las 3 mediciones de cada plántula). Complementariamente, la determinación sobre la diferencia estadística de los resultados de Y(II) de las diferentes formulaciones se realizó con el análisis Tukey; en este caso su nivel de significancia ( $\alpha > 0.05$ ) es mayor a 0.05 entonces se infiere que no existe diferencia significativa entre los valores comparados. Los resultados del análisis de ANOVA se muestran en la tabla que se incluye en el apéndice B. Gráficamente, los resultados se muestran en la figura 8-24, en la cual la barra azul corresponde al control (Peat Moss, S100).

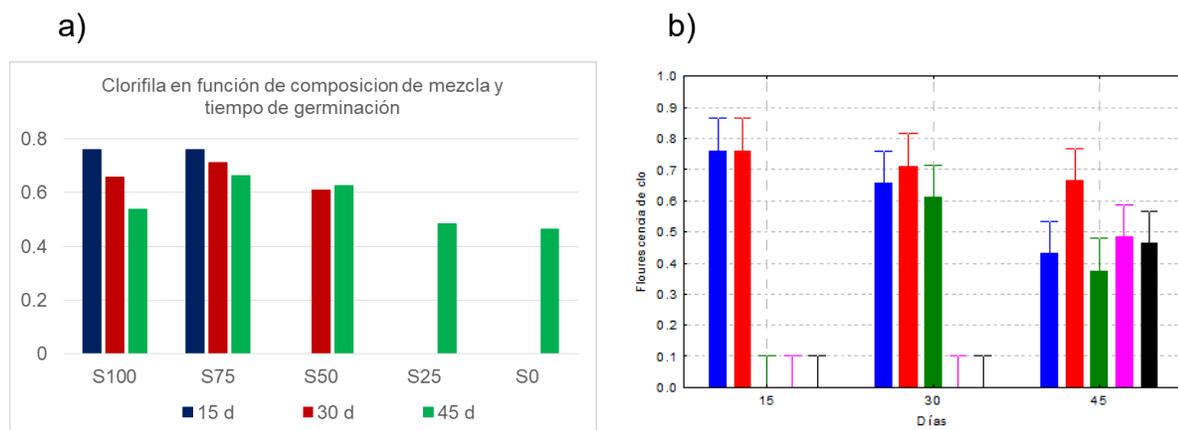


Figura 8-24. Resultados del análisis de ANOVA, a) determinación de fluorescencia de la clorofila en función de la composición de la mezcla Peat Moss – biochar, b) determinación de fluorescencia de clorofila en función de tiempo de germinación.

Para la formulación S100, que corresponde al control (100% de Peat Moss), fue evidente la disminución de Y(II) a 15, 30 y 45 días. La disminución de Y(II) sugiere que la plántula está siendo sometida progresivamente a estrés que, de acuerdo a la comparación con los otros parámetros morfofisiológicos medidos para las plántulas, parece estar correlacionado con una ligera inhibición en el crecimiento y en desarrollo de la raíz. El estrés al que está sometido la planta pudo ser causado por diferentes variables

ambientales, por la deficiencia de algunos nutrientes o por el pH de los materiales. Se propone que en el proceso del crecimiento de la plántula los nutrientes disponibles en la formulación S100 se agotaron progresivamente, por lo que puede ser conveniente la adición de aditivos adicionales. Este posible agotamiento de los nutrientes ha sido sugerido en la literatura para otros sistemas vegetales (González *et al.*, 2008; Solarte *et al.*, 2010). Acorde con esta situación, se puede también postular un posible efecto favorables de la adición de biochar para mejorar la eficiencia fotosintética en el sistema de interés, como fue evidenciado por los valores de Y(II) en la formulación S75.

Para la formulación S0, que corresponde al biochar producido a partir de la pirólisis del bagazo residual de la industria mezcalera, no fue posible hacer la medición a los 15 y 30 días. En este caso, no hubo hojas verdaderas a 15 días; posteriormente, aunque a los 30 días ya había reporte de hojas verdaderas, el tamaño de estas no fue el adecuado para llevar a cabo la determinación, Por esta razón, solo se tiene registro de fluorescencia de la clorofila a los 45 días. En comparación con la formulación S100 medido a 45 días, el valor de Y(II) fue significativamente menor, que fue consistente con el nivel de madurez que exhibió la plántula germinado en S0. Nuestros resultados muestran que es necesario optimizar las condiciones de síntesis del biochar, de forma que, tanto física (porosidad) como químicamente (pH, conductividad, contenido metálico), sus propiedades sean más afines a las condiciones necesarias para que un sustrato tenga un impacto favorable en el crecimiento de las plántulas de jitomate. Por otra parte, se hace notar que el biochar (S0) no es completamente desfavorable para propiciar el crecimiento de la plántula, solo que el desfase es muy notorio, de 30 días, y que la actividad fotosintética (valores de Y(II)) medida a 45 días es comparable a la que presenta el control (S100) para el mismo periodo de tiempo. El desfase se asoció inicialmente a la porosidad y al pH superficial de S0; estos parámetros determinan una mayor disponibilidad de nutrientes que requiere la planta para su crecimiento. El desfase observado en S0 implica que las plantas tengan menos madurez que las otras S50, S75 y S100. Se considera que en futuros estudios será pertinente monitorear las plántulas durante 15 días más, para evaluar el efecto del crecimiento en la plántula en S0 y determinar si es posible que a mayores tiempos las plántulas alcancen la madurez fisiológica esperada. Esto permitiría proponer un uso alternativo del biochar, que consiste en reservar las plántulas cuando las

condiciones climáticas sean las óptimas para el trasplante, que se conoce como latencia (Varela *et al.*, 2011).

Como es evidente en la figura 8-24, para la formulación S50 el parámetro Y(II) aumentó de 30 a 45 días, aunque al contrastar este resultado con los otros parámetros morfofisiológicos en estudio, fue evidente que hubo un retraso en el crecimiento. Esto sugiere que hubo cierto nivel de inhibición en el crecimiento de la plántula. Consideraciones similares a las indicadas en el párrafo anterior se deberán realizar en futuros estudios para validar el impacto favorable de esta formulación y obtener una mejor correlación entre los valores de Y(II) y el resto de los parámetros morfofisiológicos.

En resumen, los resultados de las pruebas de germinación de tomate:

- a) Las formulaciones S75 y S50 mostraron comportamientos similares respecto al control no observándose diferencias significativas ( $p \geq 0.05$ ).
- b) Ninguno de los tratamientos presentó síntomas de toxicidad, ni muerte de plántulas.
- c) El valor de Y(II) y, en consecuencia, el desarrollo observado en cada plántula se debe al efecto que tiene la mezcla sustrato-biochar usado como aditivo agrícola. A su vez, las propiedades de la mezcla son una función de las características físicas y químicas de cada uno de los sustratos. El análisis de los resultados de la fluorescencia de la clorofila indican que la formulación S75 fue la más favorable para promover el crecimiento de la plántula de jitomate, inclusive mejor que el control, por lo que se sugiere que el biochar generado de desechos de la industria mezcalera efectivamente aporta efectos benéficos para el crecimiento de plántulas. No se descarta que es posible mejorar la síntesis del biochar para obtener un producto con propiedades físicas y químicas preferentes para un mayor crecimiento de las plántulas y que el diseño del mismo puede ser dependiente de las condiciones usadas en el proceso de pirólisis.
- d) El pH influye en la disponibilidad de macronutrientes, por lo que se tienen la hipótesis que modificando los parámetros de pH y conductividad, el biochar puede ser utilizado como aditivo agrícola. Fuera del rango de pH es posible que las plántulas disminuyan su desarrollo.

## 9. ANÁLISIS

En esta sección se analizan los resultados incluidos en el capítulo 8 para orientar la discusión sobre los tratamientos térmicos del bagazo de agave, para evaluar y relacionar las condiciones de tratamiento con las propiedades del biochar y, para establecer como estas propiedades determinan el potencial del biochar como aditivo agrícola.

### 9.1. Diferencia en el análisis químico del bagazo de agave, biochar y Peat Moss.

En la tabla 9-1 se resume el análisis químico realizado al bagazo de agave, al biochar y el Peat Moss. El bagazo de agave presentó una composición inicial de lignina 15.7%, celulosa 33.4% y hemicelulosa 23.3%. Una vez que el bagazo se sometió al proceso de pirólisis a 350 C, se obtuvo biochar con la siguiente composición: lignina 53.6 %, celulosa 23.9%, hemicelulosa 17.5%. De acuerdo a estos resultados, el biochar mostró un menor contenido de celulosa y hemicelulosa con respecto al bagazo, lo que se asoció con el proceso de descomposición de estos compuestos, evidenciado por los resultados de la descomposición por temperatura programada. En acuerdo con resultados de la literatura, se postuló que la celulosa se descompuso entre 240 y 350 C y hemicelulosa entre 200 y 260 C (Demirbas, 2004). El porcentaje de conversión fue de 28.61% y 24.88%, respectivamente y se calculó a partir de la Ecuación 8-1. Siguiendo la misma estrategia experimental, se analizó la muestra de Peat Moss y se reportó un contenido de lignina 38.63%, celulosa 11.35% y hemicelulosa 7.37%. El biochar se reporta con un mayor contenido de lignina, respecto a Peat Moss.

Tabla 9-1. Análisis químico para biomasa, biochar y Peat Moss

Determinación	Bagazo de agave Lote 1	Biochar	Peat Moss
Extraíbles (%)	9.43	4.13	5.87
Lignina (%)	15.69	53.64	38.63
Celulosa (%)	33.40	23.85	11.35
Hemicelulosa (%)	23.31	17.51	7.37

Es importante establecer una correlación entre los resultados de la caracterización química y los determinados por Descomposición por Temperatura Programada. En el caso de la celulosa y hemicelulosa se asocia que a temperaturas entre 250 y 350 C se presenta la descomposición de estos compuestos y existe una relación entre la composición química y la cantidad producida de gases volátiles. A temperaturas mayores de los 400 C se presenta la descomposición de la lignina y, de acuerdo con la literatura, se producen vapores oxigenados. Sin embargo, es necesario validar esta suposición mediante el análisis cuantitativo utilizando complementos como la cromatografía de gases.

La validación de que los análisis por descomposición por temperatura programada son equivalentes a los resultados de la determinación de la composición de celulosa, hemicelulosa y lignina por métodos químicos, tendrá ventajas significativas, entre otras:

- a) uso de menor cantidad de muestra para el análisis,
- b) evitar uso de sustancias químicas corrosivas, como el ácido sulfúrico.
- c) al ser una técnica semiautomática, se reducirían los errores de operación.
- d) se reducirían el tiempo para el análisis y para las réplicas, cuyos resultados se esperaba que fueran con menor dispersión.

## **9.2. Efecto de la composición química en el potencial agronómico del Peat**

### **Moss y biochar**

El Peat Moss es el sustrato más utilizado en la producción en invernadero, y está formado por Peat Moss (musgo que pertenece al género *Sphagnum*), vermiculita y perlita (minerales de aluminio, magnesio y hierro). Cada componente de la mezcla, aporta una propiedad indispensable para el desarrollo de la especie vegetal, el musgo retiene humedad y aporta nutrientes, la perlita ayuda a la aireación del medio y evita la compactación; la vermiculita permite la retención química de nutrientes y modifica el pH del musgo (Hernández 2012), por lo tanto, una de las propiedades principales de esta mezcla, es que cuenta con la disponibilidad de nutrientes requeridos para la plántula como Ca, Mg y K.

### 9.2.1. Cenizas y Metales

El contenido de cenizas está relacionado con el contenido de macro y micro elementos. El Peat Moss comercial usado en este trabajo presentó un contenido de cenizas de 29.03%, por lo que se puede entonces postular que el Peat Moss tiene una suficiente disponibilidad de nutrientes. Estos resultados están de acuerdo con lo reportado por Vega *et al.* (2012), quienes indicaron que los análisis de muestras comerciales de sustratos exhibieron de 6.35 a 8% de cenizas y la presencia de micronutrientes como Mn, Fe y Zn, que son requeridos para el crecimiento adecuado de la planta. Por otra parte, la muestra de biochar sintetizada en este trabajo reporto un contenido de cenizas de 6.25%, encontrándose presente metales como Ca, Mn y altas concentraciones de Fe.

### 9.2.2. (Hemicelulosa + Celulosa) vs Lignina

En la Tabla 9-2 se muestra la relación entre el contenido de lignina, celulosa y hemicelulosa, con esta relación se determina que el biochar tiene un mayor contenido en lignina en comparación con el Peat Moss. De acuerdo con la literatura, la lignina puede sufrir degradación biológica y generar compuestos que afectan las funciones vegetales, como es el caso de los ácidos húmicos y fúlvicos. Cualquier tipo de degradación biológica en un sustrato es perjudicial, ya que los microorganismos compiten con la raíz por oxígeno y nutrientes y pueden modificar las características físicas del sustrato (Hernandez, 2012). Por otro lado, se han encontrado aplicaciones para sustratos con contenidos elevados de lignina para la producción de hongos, Rivera *et al.* (2013) en su estudio, encontraron que sustratos con contenidos mayores al 35% en lignina pueden ser viables para la producción de hongos comestibles del género *Pleurotus ostreatus*.

Tabla 9-2. Relación de compuestos estructurales de sustratos

Parámetro	Biochar	Peat Moss
% Lignina / (% Celulosa+ %Hemicelulosa)	1.29	2.05

### 9.2.3. Materia Orgánica

El adecuado contenido de materia orgánica mejora las principales funciones del suelo, entre ellas (Abad *et al.*, 2004; Lal, 2010): fertilidad, porosidad, contenido de nutrientes, amortiguación de pH, biodiversidad, relaciones simbióticas, reciclaje de nutrientes. Un mayor contenido de materia orgánica en el suelo mejora su capacidad de infiltración y percolación de agua, disminuyendo la erosión y salinización, como resultado se mejora la producción agrícola en términos de calidad y cantidad.

Abad *et al.* (2004) indicaron que es deseable tener un contenido de materia orgánica mayor al 70%, asegurando la estabilidad de la materia orgánica, ya que su descomposición rápida reduce la capacidad de intercambio de nutrientes para la planta. De forma más específica, los efectos de la materia orgánica son en las siguientes propiedades:

- 1) Retención de humedad: mayor contenido de materia orgánica permite el aumento de la capacidad de retención de humedad, aumentando la disponibilidad de agua para la planta y disminuyendo el riego. (Deurer *et al.*, 2009).
- 2) Estructura: favorece la circulación de agua y aire del suelo, facilitando el crecimiento de las raíces debido a que se disminuye la resistencia mecánica del suelo (Hirzel *et al.*, 2009).
- 3) Regulación de compuestos tóxicos: proporciona la capacidad de desintoxicación del suelo frente a compuestos dañinos como metales pesados y pesticidas, debido que la materia orgánica genera compuestos quelados que permiten la adsorción (Baldock J.A., 2007; Fronning *et al.*, 2008).

Estudios realizados por Garrido *et al.*, (2004) explican que la materia orgánica modifica la biodisponibilidad de los metales pesados. La materia orgánica es una mezcla de materiales húmicos, polisacáridos, polifenoles, proteínas, lípidos y moléculas heterogéneas con carga neta negativa y con pH's típicos entre 6-7, por lo que le permite tener capacidad de intercambio iónico y formar complejos solubles con los metales presentes en el suelo (Xiaoli *et al.* 2007). Metales como cobre demuestran tener una fuerte asociación con la materia orgánica.

### 9.3. Efecto de las propiedades físicas en el potencial agronómico del Peat Moss y biochar

#### 9.3.1. Tamaño de partícula y densidad

En la tabla 9-3, se incluye un resumen del análisis físico de las muestras de agave, biochar y Peat Moss. De forma relevante, en las condiciones de tratamiento usadas en este trabajo, el biochar exhibió un tamaño de partícula en el rango de 0.8 – 2 mm y una densidad aparente de 0.8 g/cm<sup>3</sup>. Para el caso del Peat Moss, los valores correspondientes fueron 0.6 - 0.8 mm y 0.4 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente.

Tabla 9-3. Reporte de análisis físico para bagazo, biochar y Peat Moss

Determinación	Bagazo de agave Lote 1	Biochar	Peat Moss
Humedad (%)	2.00	2.38	22.02
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	1.4	0.8	0.4
Tamaño de partícula (mm)	0.8 – 2.0	0.6 – 0.8	0.44
pH superficial	6.5	7.85	6.48
Conductividad μS/m	0.580	0.718	1.935

Autores como Lemaire *et al.*, 2003 han observado que, a mayor tamaño de partícula, menor es la densidad aparente, postulado que no se cumple en este caso, ya que el biochar tiene un tamaño de partícula menor con respecto al bagazo y reporta una densidad mayor.

De acuerdo con Pastor-Villegas *et al* (2006), hay una relación entre la temperatura de tratamiento durante la pirólisis y la densidad del biochar. Los autores sugieren que, a menor temperatura durante el tratamiento termoquímico, la densidad de Biochar será mayor, lo cual está asociado con la conversión de carbón, ya que a mayor temperatura se desordena la estructura de la red de biomasa y genera baja densidad en la estructura. Los resultados obtenidos para el biochar sintetizado reportan una densidad 0.8 g/cm<sup>3</sup> partiendo de una densidad inicial del bagazo de agave de 1.4 g/cm<sup>3</sup>. Brewer (2014)

reportan un intervalo de densidad de 0.2 a 0.5 g/cm<sup>3</sup> para biochar, dependiendo de la materia prima y del proceso de pirólisis.

El tamaño de partícula y la densidad aparente de un sustrato tienen un efecto importante en el crecimiento de plántulas. En el caso del tamaño de partícula, para la aplicación de interés, el tamaño de partícula recomendado se encuentra en un intervalo de 0.25 - 2.6 mm, lo que permite que la plántula tenga disponibilidad de agua. En el caso del Peat Moss, el tamaño de partícula mayoritario fue 0.44 mm. En el caso del biochar, la distribución del tamaño de partícula mostró que 21% de las partículas tenían un tamaño de 0.8 mm, 40% de 0.6 mm y 20% de partículas fueron mayores a 0.3 mm. De esta forma, tanto el Peat Moss como el biochar exhibieron un tamaño de partícula dentro del intervalo sugerido como recomendable. Además, no hay una diferencia notoria en la distribución del tamaño de partícula de ambos materiales, favoreciendo así una comparación y/o discriminación adecuada de esta variable en la evaluación de las propiedades funcionales de ambos materiales.

Por otra parte, de acuerdo con reportes de la literatura para la aplicación de interés, la densidad aparente de un sustrato se considera óptima en el rango de 0.1-0.8 g/cm<sup>3</sup>, con un valor mínimo de 0.3-0.4 g/cm<sup>3</sup>, ya que los rangos indicados permiten que las plántulas se sostengan de manera eficiente, sin que el peso del material sea excesivo y dificulte el manejo y transporte (FAO, 2012). De acuerdo con los resultados, el Peat Moss tiene una densidad aparente de 0.4 g/cm<sup>3</sup>, mientras que la correspondiente al biochar fue de 0.8 g/cm<sup>3</sup>. Ambos materiales mostraron densidades en los rangos óptimos para la producción de especies vegetales, haciendo notar que la del Peat Moss está más cercana al valor mínimo recomendado. Nuevamente, estos resultados discriminan a la densidad como una variable con efecto notorio en la evaluación de las propiedades funcionales de ambos materiales.

### **9.3.2. pH del sistema muestra en solución acuosa**

El pH de la interfase muestra-agua fue de 7.85 para el biochar, y de 6.48 para el Peat Moss. Se hace notar que en su estado natural el Peat Moss tiene un pH ácido (4.0) pero que al mezclarse con minerales el pH se incrementa a 6.48. El pH que se midió en el sistema referido es un promedio de diferentes procesos presentes en la interfase y que

incluyen, entre otros: la presencia de los iones de la solución, en tres casos hidronio e hidroxilos al tratarse de agua, la carga superficial que desarrolla la superficie de la muestra la cual queda determinada por su naturaleza y las condiciones de acidez/basicidad del entorno, y por la presencia de los metales en la muestra. Con fines de clarificar los posibles efectos y su contribución en la variable medida, se propone el siguiente análisis.

Un primer aspecto es considerar solo la parte del proceso de interfase en la que solo interactúan los iones del agua y los grupos funcionales superficiales de la muestra que se desarrollan al entrar en contacto con la solución. En este escenario, si el pH de la suspensión corresponde es ácido, se infiere que la carga superficial de la partícula se debe a la presencia mayoritaria de grupos funcionales con este carácter. Por otra parte, si el pH es básico, entonces los grupos funcionales superficiales de la muestra son preferentemente de este tipo. Si solo existe este efecto, los resultados mostraron que el biochar debe exhibir grupos funcionales de carácter ligeramente ácido y el Peat Moss exhibe, en promedio, grupos de carácter ligeramente ácido. En el caso del biochar se puede inferir que la superficie exhibe grupos de carácter oxigenado ligeramente básico, residuales del tratamiento térmico a 350 C. Con base a resultados previos del grupo de trabajo, si el tratamiento térmico ocurre a mayor temperatura es probable entonces que los grupos funcionales oxigenados sean totalmente descompuestos y removidos de la superficie, originando entonces una muestra con un carácter más básico aún.

Por otra parte, también se debe considerar el efecto del tipo y de la concentración de los metales presentes en cada muestra en el pH de la suspensión acuosa. En este caso, al momento de contactar la muestra en solución se establece entonces un equilibrio de los iones del solvente, de los grupos superficiales y de los metales de la muestra. Diferentes trabajos en la literatura documentan como la temperatura y el pH determinan la especiación de los metales y por lo tanto su disponibilidad en el sistema (Lehmann *et al*, 2009, Van Zwieten *et al*. 2010). En este caso, la contribución de cada uno de las variables es compleja de determinar, pero debe establecer los fundamentos para la optimización de la formulación del material más adecuado. Sin embargo, hasta donde es de nuestro conocimiento, no hay a la fecha estudios con este nivel de detalle. Desde una perspectiva práctica, la medición del pH del sistema muestra-agua es un referente para

determinar el potencial de un determinado sustrato en la promoción del crecimiento de una plántula, ya que el mismo regula la disponibilidad de todos los nutrientes (metales) en el sistema. De forma relevante, el pH óptimo del sistema muestra-agua depende de la especie a cultivar, ya que cada una de ellas tiene diferentes requerimientos nutrimentales. Para el tomate, se ha reportado que se requiere un pH óptimo en el rango de 6.2 a 6.8. Con valores de pH inferiores a 5 pueden aparecer síntomas de deficiencias de N, K, Ca, Mg y B. Por otra parte, con valores superiores a 6 se producen problemas en la disponibilidad de Fe, P, Mn, Zn y Cu (Lehmann *et al.*, 2011). En el trabajo realizado, el pH del sistema fue de la muestra de biochar empleada en las pruebas funcionales se aplicó de manera directa con un valor de pH de 7.85 para el biochar y de 6.48 para el Peat Moss. Consecuentemente, el pH del Peat Moss está justo en el rango óptimo sugerido para el caso del tomate, haciendo notar que los metales preferentemente encontrados y sus concentraciones (en ppm) fueron: Zn (48), Mn (22.5), Cu (14.1), Ba (13.4), B (11.3), Ca (3.59) y Mg (1.17); además hubo una concentración de Cr de 36 ppm. En el caso del biochar, el pH se encontró por arriba del rango óptimo y los metales preferentes fueron: Fe (221.35) Al (57.6), Ba (25), B (24.4), Zn (15.7), Cu (10), Mn (9.6) y Ca (5.9). De acuerdo con la literatura antes referida, a pesar de la elevada concentración de Fe y de las apreciables concentraciones de Zn, Cu y Mn, estos metales podrían no estar “accesibles” dadas las condiciones de pH imperantes en las interfaces del sistema muestra-agua. Es posible entonces, que esta condición de equilibrio pueda tener un impacto durante las pruebas funcionales.

Los resultados anteriores motivaron el interés por sugerir estrategias para ajustar el pH superficial del biochar para que en este caso este en el rango óptimo para el tomate y, para que, entendiendo los mecanismos relacionados, se pueda usar después para la optimización del pH para alguna otra variedad de interés. A la fecha se indican aquí las estrategias, mismas que estarán siendo evaluadas en etapas subsiguientes de este proyecto.

Se pueden postular, entre otras, las siguientes estrategias para adecuar el pH del sistema muestra-agua:

- 1) *Efecto de la temperatura de tratamiento del bagazo*
- 2) *Ajuste de los grupos funcionales del biochar sintetizado*

- 3) *Ajuste de la concentración de nutrientes*
- 4) *Mezclas de biochar y Peat Moss*

- 1) *Efecto de la temperatura de tratamiento*

De acuerdo a Nanda *et al*, (2015) la temperatura a la cual se efectúa el tratamiento térmico afecta de manera directa el pH del biochar obtenido. A temperaturas mayores que 500 C se obtendrá un pH alcalino (>9), mientras que a menores que 400 C darán pH ácidos (entre 7 y 8). De acuerdo con la literatura, el biochar puede presentar valores de pH de 6.5 hasta 12, dependiendo del tipo de biomasa y las condiciones del proceso de pirólisis (Lehmann *et al*, 2009, Van Zwieten *et al*. 2010, Lehmann *et al.*, 2011). El tratamiento de pirólisis a 350 C aplicado la biomasa permitió obtener un biochar con pH de 7.9 que se relaciona con el contenido de lignina presente en la muestra ya que de acuerdo a Huang *et al.*, 2018, existe una correlación en el contenido de lignina y el pH del biochar, reflejándose en valores de pH alcalino, debido a la presencia de grupos funcionales aromáticos y carbonatos.

- 2) *Ajuste de los grupos funcionales del biochar sintetizado*

En el caso específico de este trabajo el biochar resultante exhibió un pH de 7.85, por lo cual se postula un tratamiento ligeramente ácido para ajustar el pH en el rango óptimo reportado por el tomate (6.2 a 6.8). El procedimiento utilizado para ajustar el pH del biochar fue el siguiente:

- d) Preparar una solución de ácido acético: concentraciones en el rango de 0.005 – 0.1 M.
- e) Añadir una solución a la muestra en una relación en peso 1:2 de biochar/ácido.
- f) Agitar durante 10 min la solución con la muestra.
- g) Dejar reposar hasta que se sedimente la parte sólida.
- h) Filtrar la solución, desechar la parte líquida.
- i) Lavar el sólido recuperado con agua destilada.
- j) Secar por 24 h. en horno de convección a 60 C.
- k) Realizar la medición del pH de acuerdo a lo indicado en la sección 7.9.

Los cuatro tratamientos para la acidificación de biochar se reportan en la Tabla 9-4. Como se puede observar las diferentes concentraciones de ácido modificaron el pH del biochar, en un amplio rango de valores, encontrándose desde un pH ácido en 4.6 hasta un pH básico de 7.56. Con base a lo anterior, el tratamiento con ácido acético 0.01 M fue el más adecuado para obtener una condición de equilibrio para el sistema muestra-agua en el rango de 6.2 -6.8.

Tabla 9-4. Tratamientos para ajuste de pH al biochar

Tratamiento		pH
1	Ac. acético 0.1 M	4.6
2	Ac. acético 0.05 M	5.43
3	Ac. acético 0.01 M	6.02
4	Ac. acético 0.005 M	7.56

### 3) *Ajuste de la concentración de nutrientes*

El análisis químico realizado al sustrato será el que determine si es necesario agregar nutrientes. De acuerdo a FAO, una fertilización eficiente es aquella que, con base en los requerimientos nutricionales de la planta y el estado nutricional del suelo, proporciona los nutrientes en las cantidades suficientes, implicando mantener un balance entre los elementos, tanto en el suelo como en las diferentes estructuras de la planta. El programa de fertilización debe considerar los siguientes puntos:

- a) Tipo de cultivo.
- b) Necesidades nutricionales del cultivo.
- c) Características y aportes de nutrientes del terreno.
- d) Contenido de nutrientes aportados por el fertilizante.
- e) Solubilidad del producto.
- f) Dosis y momento de aplicación.

Se debe tener en cuenta que el tomate es una planta exigente en nutrientes; requiere una alta disponibilidad de macronutrientes como N, P, K, Ca, Mg, S, y micronutrientes como Fe, Mn, Cu, B, Zn. Aunque la exigencia de N es alta, un exceso de este elemento puede llegar a un exagerado desarrollo vegetativo con bajo porcentaje de formación de frutos. Desde el momento del trasplante hasta la floración, la relación de

fertilización de nitrógeno y potasio debe ser 1:1; cuando comienza el llenado de fruto, se requiere una cantidad mayor de potasio, ya que este elemento contribuye con la maduración y el llenado de frutos; la relación de estos nutrientes debe ser 1:2 o 1:3.

(<http://www.fao.org/tempref/docrep/fao/010/a1374s/a1374s03.pdf>)

#### 4) *Mezclas de biochar y Peat Moss*

Considerando que el pH del sistema muestra-agua es óptimo para el Peat Moss y ligeramente básico para el biochar, como parte de la estrategia experimental, se propuso evaluar mezclas de biochar y Peat Moss, de acuerdo a lo indicado en la sección 7.10.

En la Figura 9-1 se presentan los resultados de pH del sistema muestra-agua para cada una de las formulaciones propuestas. Los pH de las muestras variaron en el rango determinado por los valores de pH de cada una de las muestras, 6.4 para el Peat Moss y 7.8 para el biochar. Se puede establecer que la dependencia del pH es no es lineal en todo el rango con respecto a la cantidad de biochar. Este perfil es importante porque puede sugerir el efecto acoplado de dos factores. La literatura reporta que en el caso de cuando una muestra sólida se pone en contacto una solución acuosa, se desarrollan cargas superficiales en función del pH y es posible identificar la condición de pH en el cual la carga neta superficial es cero. Esta condición se conoce como el punto de carga cero (PCC) de la muestra. Así mismo, la literatura establece que cuando dos muestras de diferente PCC se ponen en contacto en solución, el pH de la mezcla resultante varía linealmente en función de la composición de uno de los compuestos. Este ocurre porque el fenómeno de interface, en ausencia de iones, solo implica la interacción con la superficie, la cual depende de su fracción en masa en la mezcla. De esta forma, el perfil mostrado en la figura 9-1, sugiere que además de la fracción en peso de cada muestra debe existir otra variable que determina el pH final del sistema muestra-agua. Se postula que la diferencia de concentración de los metales puede explicar la variación no lineal observada. Esto se debe a que ambas muestras, biochar y Peat Moss, tienen diferentes cantidades de cada uno de los metales, que además presentan una especiación diferente en función del pH. Para validar la propuesta se requerirá de un análisis más detallado de la especiación de cada conjunto de metales disponible para cada muestra, en función del pH. Para los fines prácticos del estudio en esta etapa del proyecto, se deja como premisa

la relevancia relativa que pueden tener los metales en el pH final del sistema y, en consecuencia, del posible impacto de esta variable en el potencial de la misma para favorecer el crecimiento de una especie de interés.

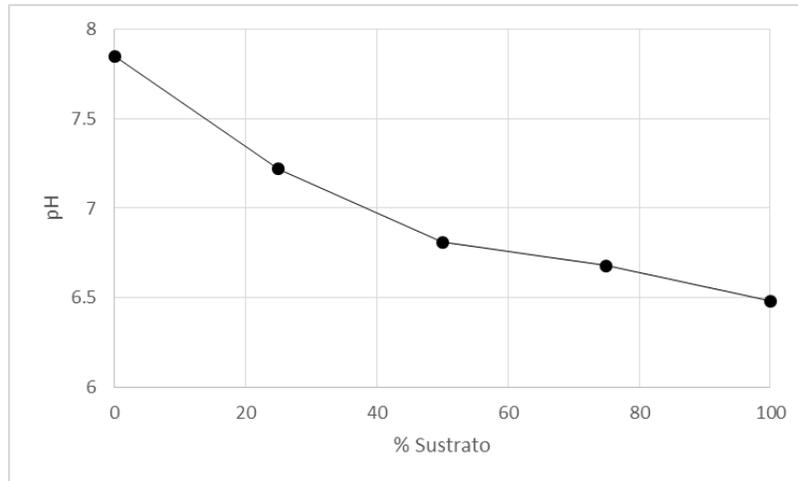


Figura 9-1. Análisis de pH para las mezclas biochar-sustrato

### 9.3.3. Conductividad del sistema muestra en solución acuosa

La conductividad eléctrica (CE) es una medida de la relación de las cantidades de sales solubles que son considerados como nutrientes disponibles para ser absorbidos por la variedad en estudio. Estas sales incluyen cationes como Na, K, Ca y Mg, y aniones como  $\text{Cl}^{-1}$ ,  $\text{SO}_4^{-2}$ ,  $\text{HCO}_3^{-3}$  y  $\text{CO}_3^{-2}$ . El valor de CE específicamente para la producción de plántulas en semilleros, el rango es de 0.75 a 2.0  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Lehmann 2007). En este trabajo el biochar y el Peat Moss presentaron una conductividad de 0.71 y 1.935  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . De esta forma, el biochar se ubica en la cota inferior y el Peat Moss en la cota superior del rango reportado como óptimo para el caso de la producción de plántulas en semilleros. Las diferencias observadas deben ser en relación a la diferente distribución de metales en cada una de las muestras. Como se ha indicado, el Fe, Al, Ba y B fueron los preponderantes en el caso del biochar, a diferencia de Pet Moss que exhibió, preferentemente, Zn, Mg, Cu y B. Se hace notar que a la fecha no se ha documentado la cantidad de aniones presentes en cada muestra.

Por otra parte, la figura 9-2 muestra la variación de la CE para las mezclas de biochar-Peat Moss. La variación entre las dos cotas de CE establecidas por el biochar y el Peat Moss es claramente no lineal. La presencia de un mínimo evidencia el efecto de

la contribución de dos variables que, por la naturaleza de la propiedad medida (CE) deben ser la concentración de cationes y aniones. Como se indicó, la diferencia en la concentración de metales es notoria y mayor para el biochar, pero para el caso de los aniones no se dispone de información. Este resultado evidencia la relevancia de conocer la concentración de aniones, para identificar en qué medida se explica el comportamiento observado en la CE de las mezclas y, sobre todo, para determinar el efecto que tiene en las pruebas funcionales de crecimiento de plántulas.

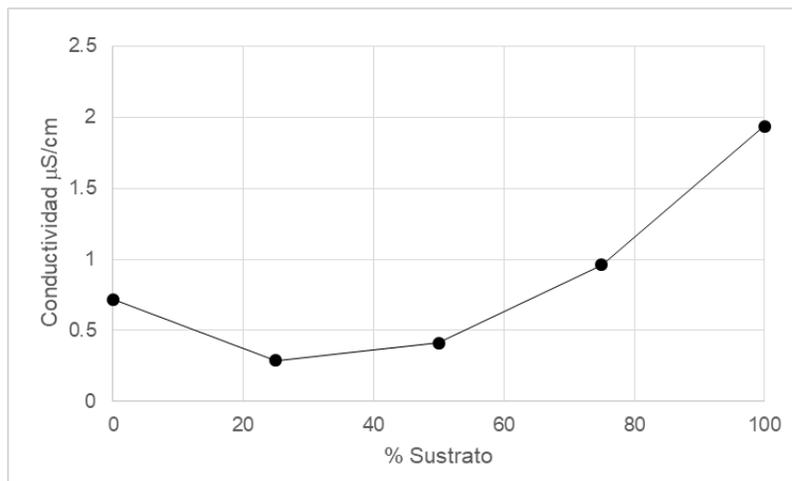


Figura 9-2. Análisis de conductividad para las mezclas biochar-Peat Moss.

#### 9.4. Comparación del funcionamiento del Peat Moss y el Biochar.

En la tabla 9-5 se tiene el resumen comparativo entre los dos sustratos de estudio. El Peat Moss se caracteriza por tener las siguientes propiedades físicas: pH entre 5.8 y 6.2, alta porosidad, capacidad de retención de agua y aireación adecuada. Mientras que el Biochar presentó una densidad de  $0.8 \text{ g/cm}^3$ , tamaño de partícula entre 0.6 y 0.8 mm. Hasta el momento no se tiene evidencia del posible efecto en la concentración de la composición química, para el biochar reporta celulosa + hemicelulosa 41.36%, y lignina 53.6 %, mientras que para el Peat Moss reporta celulosa + hemicelulosa 18.72% y lignina 53.6 %.

Tabla 9-5. Comparativa de resultados Peat Moss y Biochar

Tipo	Parámetro	Rango óptimo / Tendencia para plántulas de tomate	Peat Moss	Biochar
Químico	Cel + Hemicelulosa %		18.72	41.36
	Lignina %		38.63	53.64
	Materia orgánica %	>70	70.97	93.75
	Cenizas y metales %	6.35-8.00	29.03	6.25
Físico	Tamaño de partícula mm	0.25 a 2.6 mm	0.44	0.6 – 0.8
	Densidad g/cm <sup>3</sup>	0.1 a 0.8	0.4	0.8
	pH sistema muestra- agua	6.2 a 6.8	6.48	7.85
	Conductividad μS/m	0.75 a 2.0	1.935	0.718

En realidad, el potencial del biochar y/o del Peat Moss como sustrato agrícola no queda definidos por una sola propiedad, sino más bien por el balance de distintas propiedades que, a su vez, son el resultado de las propiedades químicas y físicas del material. Esta situación se esquematiza en la figura 9-3, para el caso del biochar las propiedades dependerán en primera instancia de las características físicas y químicas propias de la materia prima, estas características serán modificadas a través del proceso de pirólisis, las propiedades que se obtengan en el biochar, estarán en función por el tiempo y la temperatura del tratamiento.

Para el caso de las propiedades físicas en un sustrato, el tamaño de partícula y la densidad aparente, tendrán relación con la capacidad de retención de agua. Para las propiedades químicas, existe relación entre el contenido de la materia orgánica y la composición de celulosa y hemicelulosa. Así mismo el contenido de cenizas estará en función a los metales disponibles que serán empleados como nutrientes para la especie vegetal. El conjunto de estas propiedades determinará el éxito del sustrato para la producción de plántulas de tomate.

A partir de las condiciones de tratamiento de pirólisis es posible realizar un diseño adecuado para obtener un biochar de acuerdo a la aplicación. Para el caso del crecimiento de plántulas de tomate, se espera que las características físicas del material, sean un pH entre 6.2 y 6.8, conductividad entre 0.75 y 2.0  $\mu\text{S}/\text{m}$ , estas condiciones sería posible lograrlas con la modificación del proceso, con temperatura equivalente a los 400 C y es requerido realizar un estudio más detallado del tiempo de reacción en el reactor

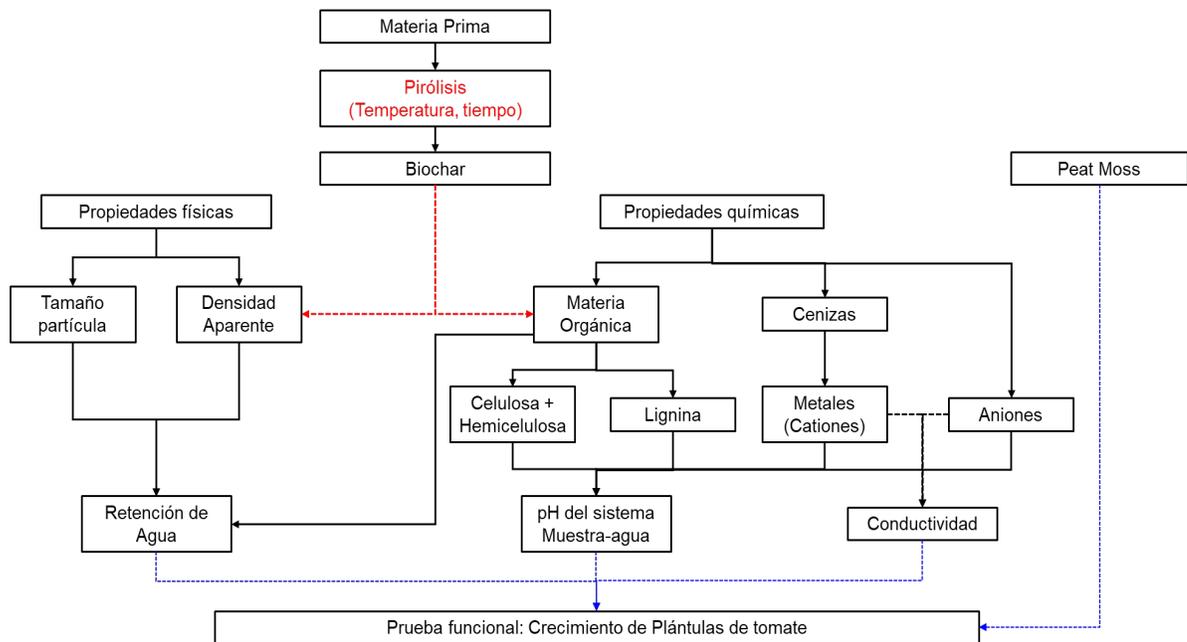


Figura 9-3. Esquema de resumen de propiedades físicas y químicas

### 9.4.1. Pruebas funcionales

En la tabla 9-6 se resumen los principales resultados de las pruebas funcionales para el biochar, el Peat Moss y las mezclas con 75, 50 y 25 % de biochar.

Tabla 9-6. Principales resultados de pruebas funcionales

Sustrato	Resultado
0% Biochar (100% Peat Moss)	Germinación a los 4 días. En los primeros 30 días, el crecimiento fue el característico del Peat Moss.
25% Biochar	Germinación a los 5 días. A los 30 y 45 días, no existe diferencia estadística con el control (Peat Moss 100%), respecto a los caracteres evaluados.

50% Biochar	Germinación a los 8 días. El crecimiento es diferente durante los primeros 30 días respecto al Peat Moss a los 45 días, no existe diferencia estadística con el control.
75% Biochar 100% Biochar	Germinación se dio a los 15 y 16 días, respectivamente. Las características de crecimiento fueron muy similares en estas formulaciones

Las plántulas sembradas en la formulación 100% Peat Moss, germinación a los 4 días. Después de los 30 días se calculó con la Ecuación 9-1, el porcentaje de germinación (%G) que es la manera de comparar la calidad de las semillas. Para la formulación al 100% de Peat Moss, el porcentaje de germinación es de 86.66%.

$$\%G = \frac{\text{Semillas germinadas}}{\text{Numero total de semillas}} \times 100 \quad 9-1$$

En la figura 9-4 se observa el desarrollo de la plántula respecto a la altura. En la barra azul se expresa el crecimiento de la plántula con la formulación de estudio (Peat Moss 100%), a los 45 días reporto la mayor altura con 91.17 mm. En la barra color naranja se observa la comparación con el estudio realizado por Hesham *et al.* 2018, los autores evaluaron diversos sustratos para la producción de especies de tomate, *solanum lycopersicum* var. super strain b, emplearon como referencia una formulación de Peat Moss, ajustando el pH con vermiculita y perlita, además agregaron soluciones nutritivas ricas en fosfatos, a los 30 días se reportó una altura de 284 mm, En comparación, se tiene una diferencia respecto al crecimiento de las plántulas, sin embargo se puede atribuir primeramente a la especie vegetal empleada, y segundo a que el estudio llevado a cabo para esta tesis, se realizó sin la presencia de soluciones nutritivas o fertilizantes, por lo que se supone que es requerido el empleo de otros reactivos, aún en el caso de Peat Moss, para tener mejores resultados, sin embargo el usar fertilizantes aumento los costos de producción de plántulas.

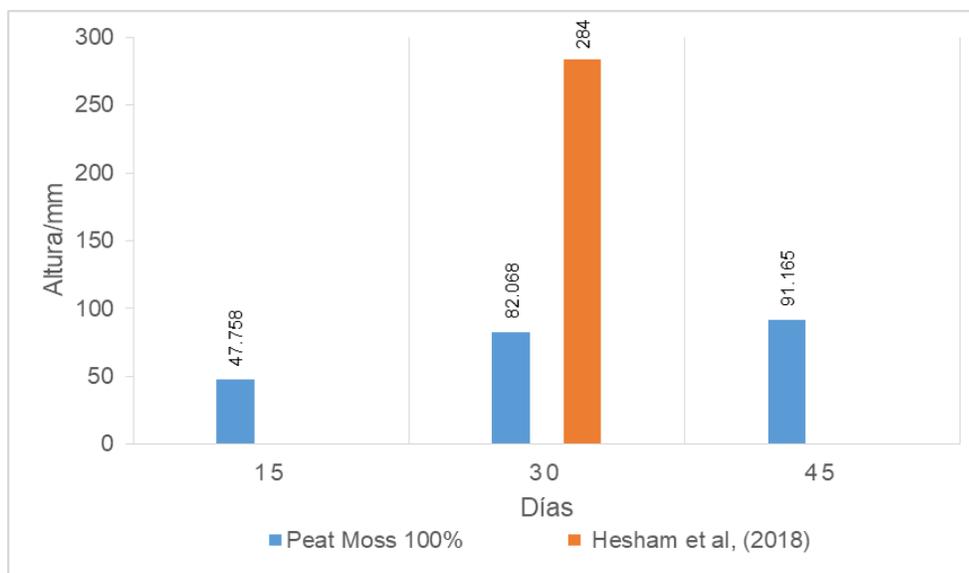


Figura 9-4. Comparación del crecimiento de la plántula para el caso de estudio con la referencia (Hesham *et al.*, 2018)

Para la formulación de Biochar al 100% la germinación se dio a los 15 días y el porcentaje de germinación es del 100%. Respecto al crecimiento de la plántula, la mayor altura se reportó a los 45 días, con 26.00 mm. En la figura 9-5 se puede observar las diferencias de la altura del Biochar (barra color verde) y Peat Moss (barra color azul). En comparación, se tiene una diferencia respecto al crecimiento de las plántulas, sin embargo se puede atribuir a que el Biochar tiene un pH alcalino, por lo que la disponibilidad de nutrientes no han sido las óptimas, sin embargo el retraso en la germinación puede ser empleada para otras aplicaciones agronómicas que serán discutidas en esta tesis posteriormente.

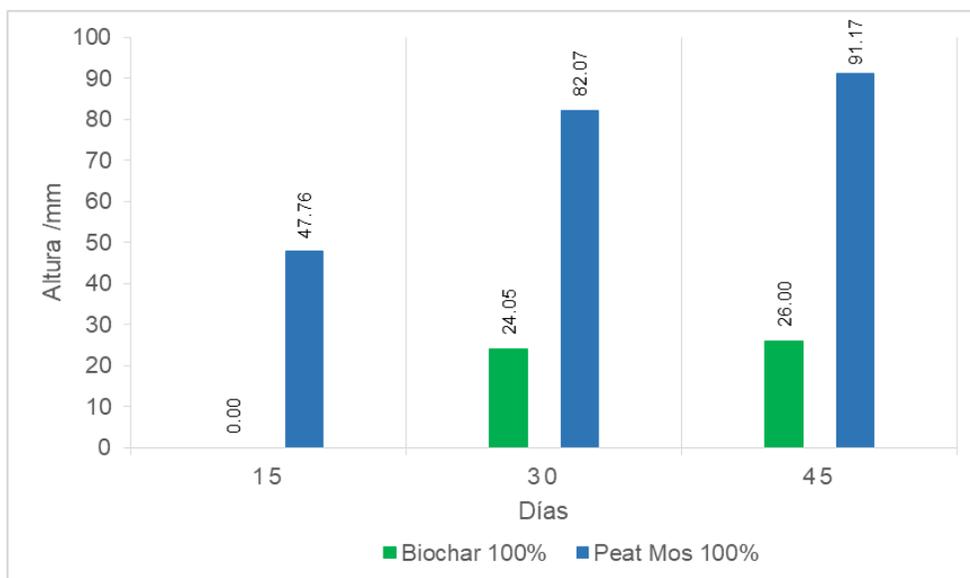


Figura 9-5. Crecimiento de la plántula, comparativa caso de estudio Biochar vs Peat Moss

Para la mezcla con el 75% de biochar la germinación se dio a los 15 días y con el 100% de germinación. Se sospecha que el retraso en la germinación se debe a la falta de ajuste en el pH, esta formulación tiene un comportamiento similar a la formulación S0. Conforme se disminuye el porcentaje de biochar en las formulaciones, se tienen condiciones similares a las del control. 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 y las plántulas crecidas en las mezclas de biochar con 50 y 25%. Así mismo se reporta que no hay retraso en la germinación de las semillas y se tiene un 100% de germinación.

#### 9.4.2. Mezclas de sustrato viables

Estos resultados sugieren que una mezcla de Peat Moss con solo 25 y 50% de biochar (muestras S75 y S50, respectivamente) tiene efectos positivos, estadísticamente equivalentes en el desarrollo de las plántulas. Esta condición de entrada, reduce la cantidad de Peat Moss necesaria en la producción de plántulas de jitomate en semilleros, ya sea en un 25% o hasta en un 50%.

Como se indicó anteriormente, la retención de agua, el pH del sistema muestra-agua y la conductividad son parámetros que determinan el potencial del material como sustrato agrícola. De manera general, las plántulas con tratamientos de menor proporción de biochar (S75 y S50), se desarrollaron en un rango de pH similar al control, así como en la conductividad eléctrica, por lo que se determina que es una de las razones por las que no se presentaron diferencias estadísticas respecto a la formulación S100.

Por otra parte, en las formulaciones con una cantidad preferente de biochar 75 y 100 % (S25 y S0), se observó un retraso de 15 días en la germinación, afectando en la aparición de hojas verdaderas hasta los 30 y 45 días respectivamente. Se postula que el retraso se vio afectado por el pH del sistema muestra-agua, ya que estas formulaciones, el valor de pH fue mayor a 7.0 unidades, lo que repercute en la disponibilidad de macronutrientes en las hojas, provocando la inhibición de crecimiento respecto al control.

La tendencia respecto a la longitud de raíz y el diámetro del tallo fueron significativamente mayores entre las formulaciones con mayor contenido de Biochar (S25 y S0). Sin embargo, comparando entre ellas la formulación con el 100% de biochar (S0) presentó un diámetro del tallo mayor después de 45 días, lo que se traduce en un mayor desarrollo de la plántula, estimado en un 24%. La longitud de raíz y el diámetro del tallo se deben a la presencia de macronutrientes (K, Ca y Mg), por lo que se postula que el biochar tiene una cantidad suficiente de estos elementos. Sin embargo, es importante el ajuste en la conductividad y el pH para tener la mayor disponibilidad de nutrientes. Para el caso de S100 y S75 no se tuvieron diferencias estadísticas.

Para el peso fresco y peso seco, las formulaciones S100 y S75 durante los 45 días no tuvieron diferencias estadísticas entre ellas. Se observa que entre mayor proporción de biochar en las formulaciones, la diferencia de peso entre el control es mayor, para la formulación S100 se reportan a los 45 días un peso fresco de 2.13 g mientras que para las formulaciones S25 y S50 se reportan 0.18 y 0.13 g respectivamente. El peso seco la formulación S100 es de 0.279 g mientras que para las formulaciones S25 y S50 se reportan 0.007 y 0.022 g respectivamente. Ambos parámetros están relacionados para la determinación de biomasa.

Por otra parte, las formulaciones con el 75 y 100% de biochar presentaron retrasos en la germinación de las semillas, en el sector forestal se utiliza la palabra latencia para referirse al aparente estado inactivo de la semilla a germinar. En algunos programas de producción de plántulas en vivero, la latencia posee una importante función que consiste en restringir la germinación en la planta madre antes de su dispersión en el campo hasta que se determine que los factores ambientales sean los favorables para el desarrollo de la plántula (Varela *et al.*, 2011). Por lo tanto sería interesante proponer una vertiente de estudio para determinar el efecto del biochar sobre el retraso de la germinación y poder aplicar de esta manera el biochar para provocar latencia en semillas de especies forestales y su posterior producción.

Los resultados obtenidos sugieren que el biochar tiene efectos positivos en el desarrollo de las plántulas, por lo que es posible su empleo en forma de mezclas de biochar-sustrato, hasta el momento es posible recomendar el uso hasta del 25% de biochar. Aunque es en bajas concentraciones ya se pueden apreciar ahorros económicos en la compra del sustrato. Para el empleo del 100% del biochar es posible encontrar otras aplicaciones agronómicas.

#### **9.5. Análisis del proceso de producción de biochar.**

En la figura 9-6 se tiene el diagrama de flujo general para la producción de biochar a partir del bagazo residual de la industria mezcalera local. Partiendo de 100 kg de biomasa húmeda, las pruebas de secado comprobaron que la materia prima tiene un 74% de humedad. Con base en este resultado y a la fracción biomasa perdida en el proceso de molienda y manipulación entre pre-tratamiento, la biomasa seca resultante fue de 21.4 kg. Como se documentó, en las condiciones usadas en este trabajo para la etapa de pirólisis, la fracción de sólidos resultante correspondió al 40% de la biomasa seca cargada al reactor. En consecuencia, la cantidad de biochar producido fue de 9.04 kg. Si se estima un 9 % de pérdidas de materia prima durante la síntesis, la cantidad de biochar disponibles es 8.2264 kg.

De acuerdo con los resultados anteriores, de cada 100 kg de bagazo húmedo se pueden obtener 8.2264 kg de biochar, y en consecuencia la eficiencia global del proceso es de 42% (Ecuación 9-2 y 9-3).

$$R_{Biochar}^{Proceso} \frac{9.04}{100 \text{ kg}} \times 100 = 9\% \quad 9-2$$

$$R_{Biochar}^{Pirólisis} = 42\% \quad 9-3$$

De acuerdo con la literatura, los rendimientos de biochar en la pirólisis lenta de bagazo varían entre 20 – 45 %, en función de la materia prima y de las condiciones de operación (Urien *et al.*, 2013, Suarez *et al.* 2019). Los rendimientos obtenidos en este estudio (42%) se encuentran dentro del rango reportado, considerándose aceptable y cumpliendo el objetivo de producción preferente de biochar.

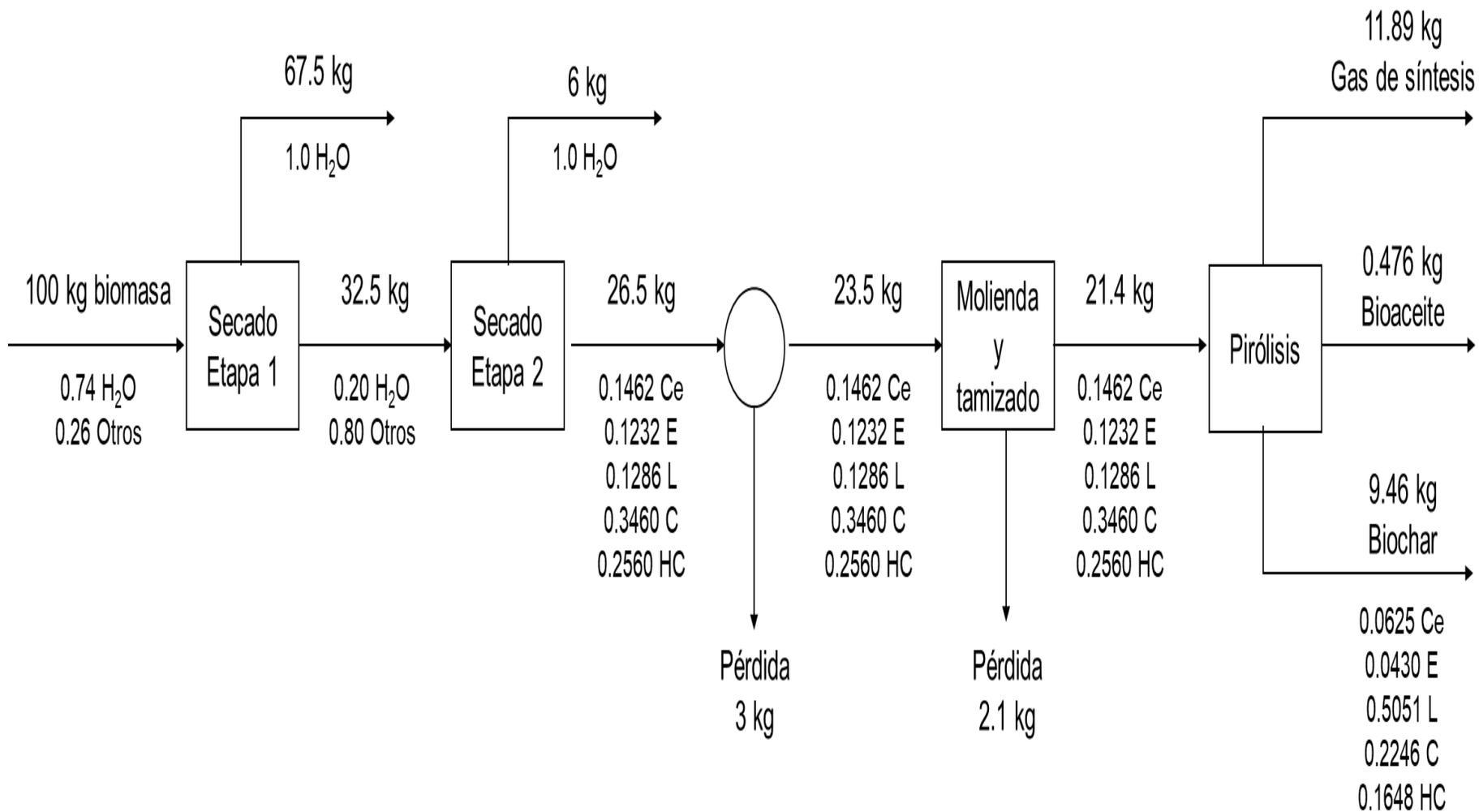


Figura 9-6. Diagrama de flujo de la producción de biochar

### 9.5.1. Estimación del carbón secuestrado en el proceso.

El cálculo del porcentaje de carbón secuestrado, se realizó de acuerdo al ciclo propuesto por la FAO (<http://www.fao.org/3/b-i6937s.pdf>), que describe el proceso de secuestro de carbono en tres etapas:

- I. Extracción del CO<sub>2</sub> de la atmósfera a través de la fotosíntesis de las plantas.
- II. Transferencia de carbono del CO<sub>2</sub> a la biomasa vegetal.
- III. Transferencia de carbono de la biomasa vegetal al suelo. Para el caso de estudio, el CO<sub>2</sub> se almacena en forma de biochar.

De acuerdo a la propuesta del grupo de trabajo, mediante la aplicación agronómica del biochar es posible el secuestro de C. En la figura 9-7 se presenta el mecanismo de conversión de formación de biochar.

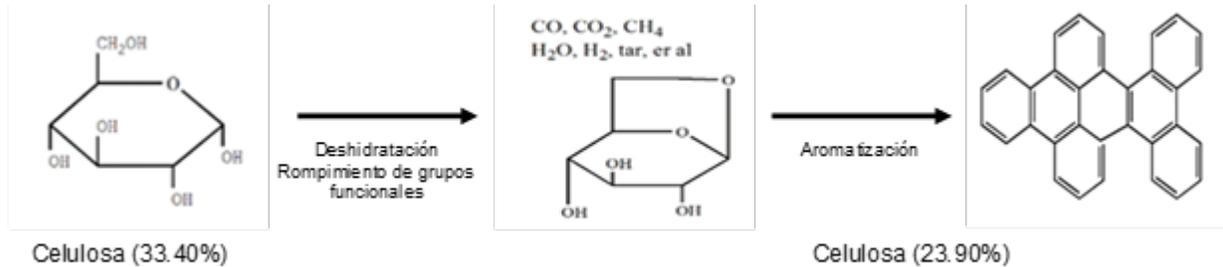


Figura 9-7. Mecanismo de formación de biochar a partir de celulosa

Para calcular el %C secuestrado a partir de 100 kg de biomasa se basará en la conversión de celulosa. La celulosa (C<sub>6</sub>O<sub>5</sub>H<sub>10</sub>) tiene un peso molecular de 162 g/mol lo que equivale a un contenido de carbono del 44% (Ecuación 9-4)

$$\%C_{celulosa} = \frac{(12 \frac{g}{mol})(\# \text{ atomos de C})(100\%)}{178 \frac{g}{mol}} \quad 9-4$$

Se tiene un 33.40% de celulosa en la biomasa, lo que representa 7.40 kg de celulosa presente en biomasa. Para el caso de biochar se reporta un contenido de celulosa del 22.46% que representa 2.040 kg de celulosa (Ecuación 9-5).

$$Kg_{celulosa} = (Kg \text{ de biomasa})(Fracción \text{ celulosa}) \quad 9-5$$

Con los rendimientos de la conversión de celulosa se determina que es posible secuestrar el 29% de C (Ecuación 9-6 y 9-7)

$$\%Celulosa = \frac{(Kg \text{ celulosa}_{biomasa}) - (Kg \text{ celulosa}_{biochar})}{Kg \text{ celulosa}_{biomasa}} * 100 \quad 9-6$$

$$\%C_{sequestrado} = (\%celulosa)(0.44) = 29\%$$

9-7

### 9.5.2. Consideraciones económicas preliminares

Comercialmente el sustrato se vende en aproximadamente \$350.00 en presentaciones de 5 kg, el costo de 100 kg, sería un total de \$7,000.00. Si se logra sustituir el 25% con biochar, solo se requerirán 75 kg de Peat Moss que corresponde a \$5,250.00. A esta cantidad habría que sumar los costos de producción de 25 kg de biochar, para tener el diferencial neto, lo que corresponde a un total de \$1,210 por 25 kg de biochar, lo que equivale a un ahorro del 7.7%.

Por otra parte, para tener un aproximado del costo de la producción de Biochar, se tomaron en cuenta las siguientes suposiciones, de acuerdo a una experiencia de nivel laboratorio:

- a) Estimación del cálculo para una producción de 1 kg de biochar, con las características y dimensiones mencionadas anteriormente del reactor, se puede producir en promedio 20 g de biochar por lote, por lo que se requieren 50 lotes para producir 1 kg de biochar.
- b) Para cada lote, es necesario aplicar un voltaje 600 W durante un promedio de 1.3 h. Lo que equivale a un consumo energético de 0.8 kWh (Ecuación 9-8).

$$E_{kWh} = \frac{(P_w)(t_{hr})}{1000} \quad 9-8$$

En consecuencia, para la producción de 1 kg de biochar se requiere un consumo energético de 40 kWh

- c) De acuerdo al esquema tarifario vigente de la CFE, la categoría tarifaria GDMTH tiene un costo de \$1.21 kWh.

$$Costo_{biochar} = (40 kWh)(1.21) = 48.4 \quad 9-9$$

Por lo tanto, para la producción de 1 kg de biochar se estima un costo de \$48.4. Extrapolando estos datos el costo para producir 25 kg de biochar es \$1,210.00.

Es importante reiterar que el costo propuesto es una estimación preliminar, ya que no toma en cuenta otros elementos necesarios para determinar el costo de producción por kg de biochar a nivel laboratorio, entre ellos:

- a) Consumo del gas He.
- b) Solventes orgánicos.
- c) Mano de obra.
- d) Aunque la materia prima es un residuos, se requiere proponerla logística adecuada para su transporte, almacenamiento y pre-tratamiento requerido para el proceso de pirólisis.

Con base a lo anterior, un estimado preliminar de los ahorros al sustituir el Peat Moss con biochar, son los siguientes:

Tabla 9-7. Costos de biochar y Peat Moss

Formulación	Costos	Total	Diferencia	% Ahorro
100 Kg de Peat Moss	\$7,000	\$7,000		
75 kg de Peat Moss	\$5,250	\$6,460	\$540	7.7
25 Kg de Biochar	\$1,210			
50 kg de Peat Moss	\$3,500	\$5,920	\$1,080	15.4
50 Kg de Biochar	\$2,420			
25 kg de Peat Moss	\$1,750	\$5,380	\$1,620	23.1
75 Kg de Biochar	\$3,630			
100 Kg de Biochar	\$4,840	\$4,840	\$2,160	30.9

La Tabla 9-7 es un estimado de los posibles ahorros que se tendría de ser posible sustituir al Peat Moss como sustrato. Se estima que utilizar una formulación 75% Peat Moss y 25% Biochar tendría ahorros del 7.7% El usar un sustrato al 100% producido a partir de biomasa residual tendría un ahorro del 30.9%.

No obstante, se debe hacer énfasis que si bien la parte económica es de vital importancia para el desarrollo de esta tecnología, otros aspectos igualmente importantes

y que no son fáciles de cuantificar son los aspectos ambiental. El uso de biochar (incluso en bajas proporciones) implica favorables beneficios, tales como el aprovechamiento de un residuo lignocelulósico y reducción de C en la atmósfera.

### **9.6. Mejoras necesarias en el biochar para que reemplace íntegramente al Peat Moss**

Se hace la observación nuevamente que las pruebas funcionales se llevaron a cabo con la aplicación directa de biochar, sin el ajuste de pH y sin aplicar fertilizantes, se considera que es probable mejorar el material realizando algunos ajustes en:

a) Cambios en las condiciones de síntesis del biochar

Se realizarían pruebas para comprobar el efecto del tiempo de reacción el reactor y el pH del biochar. Aunque no se tienen pruebas contundentes del efecto de la lignina presente en el sustrato, un mayor tiempo de reacción conllevaría a reducir el contenido de lignina. La modificación del proceso de síntesis también haría un ajuste, en densidad y composición química de la materia orgánica (C + H + L)

b) Ajuste de pH

La optimización del pH puede mejorar el potencial del biochar sintetizado. Las alternativas son el ajuste de pH con una solución de ácido acético 0.01 M.

### **9.7. ¿Que se requiere para el desarrollo de un paquete tecnológico?**

La estructuración de un paquete tecnológico, es el conjunto de conocimientos empíricos o científicos, nuevos o adaptados, de acceso libre o restringido, jurídicos, comerciales o técnicos, necesarios para producir un bien o servicio (<https://innovacionesit.wordpress.com/category/paquete-tecnologico/>). La información recabada durante el estudio puede ser la base para el desarrollo de un paquete tecnológico. En la figura 9-8 se propone el diagrama inicialmente propuesto en este trabajo para guiar en el futuro próximo la generación de un paquete tecnológico. De acuerdo con este diagrama, y a la serie de actividades realizadas a la fecha, el proyecto inició con la identificación de una necesidad real de la industria. En el caso específico se identificó y validó que la industria de mezcal genera una gran cantidad de residuos de biomasa que la mayor parte del tiempo son expuestos a la atmósfera, donde luego se

degradan, o bien se usan como materia prima para generar energía eléctrica en calderas. En este escenario, como se mostró en la Figura 9-8, se identificaron alternativa de valorización de los residuos de proceso, seleccionando la conversión de bagazo en biochar, para una aplicación que potencialmente puede generar valor agregado. A partir de la definición de este problema la estrategia a seguir consiste hasta la fecha en:

- a) Definición del área de oportunidad: se realizó un estudio del arte con el posible impacto ambiental y económico que tiene el uso del biochar.
- b) Se estableció una metodología termoquímica para la producción de biochar.
- c) Documentación de proyecto científica del proyecto mediante la elaboración de reportes técnicos.
- d) Identificación de mejoras logradas y retroalimentación para optimizar las condiciones de operación de la pirólisis para desarrollar un biochar con mejores propiedades físicas y químicas que permitan su uso directo como sustrato agrícola.

Con la información recabada se pretende elaborar un paquete tecnológico que sea escalable a aquellas industrias que tengan el interés de valorizar los residuos de biomasa generados en sus procesos, a manera general las etapas que se proponen para la producción y evaluación del biochar que consiste en las siguientes etapas:

- a) Etapa 1: tratamiento térmico del bagazo: obtención del biochar a partir de un proceso de pirólisis.
- b) Etapa 2: caracterización física, química y morfológica del biochar.
- c) Etapa 3: evaluación del biochar como aditivo de suelos:
  - I. Evaluación del comportamiento fisicoquímico de un sustrato y sus respectivas combinaciones con Biochar para el aporte de ventajas en el manejo, la producción y la calidad de cultivos
  - II. Bioensayos: se usará un tipo de cultivo de alta importancia económica en la zona de estudio, donde se evaluarán los parámetros de germinación y de calidad de las plantas desarrolladas sobre cada mezcla propuesta.

En una etapa subsiguiente se deberá:

- d) Optimizar la formulación del biochar y de ser posible, hacer pruebas a nivel piloto (10 kg / lote), para una mejor estimación de servicios y costos.

- e) Realizar los estudios tecno-económicos que documenten beneficios económicos y los impactos favorables en el ciclo de vida (sustentabilidad).
- f) Documentar y registrar la tecnología desarrollada (gestión de la propiedad intelectual).
- g) Identificar a los actores estratégicos de la cadena de valor para hacer la gestión de transferencia de tecnología.
- h) Criterios y recomendaciones de manejo de cada material.
- i) La relación costo beneficio que de cada una de las mezclas evaluadas. Con base en los costos de obtención de este tipos de materiales y los rendimientos de los cultivos ensayados se obtendrá la relación costo/beneficio para cada tratamiento.

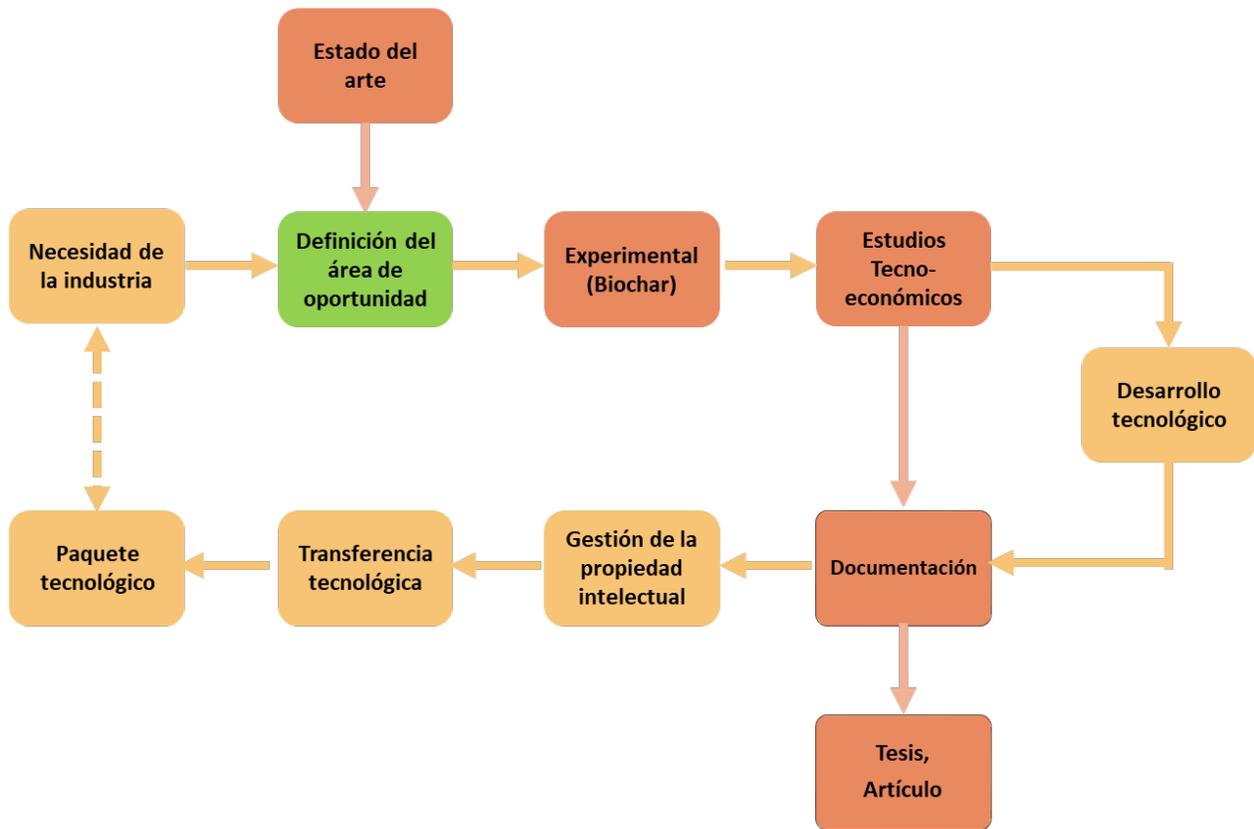


Figura 9-8. Diagrama para el paquete tecnológico.

## 9.8. Validación de la hipótesis de la tesis.

La hipótesis de la tesis propuso realizar la pirólisis del bagazo de agave, bajo condiciones de tratamiento térmico moderado, para producir biochar y plantear una alternativa de sustrato en la producción de plántulas.

Los resultados del trabajo realizado validan la posibilidad de utilizar el bagazo residual de una industria mezcalera en San Luis, para la producción del biochar. Una serie de pruebas funcionales demostraron que si bien el biochar puro exhibe un potencial acotado para el crecimiento de plántulas de jitomate, las mezclas de biochar con un sustrato comercial (Peat Moss) demostraron que es posible sustituir parcialmente al sustrato comercial con biochar, para promover el crecimiento de la plántula.

Específicamente, los impactos más relevantes son:

### ➤ **Técnico:**

El biochar producido del bagazo de Agave *Salmiana*, puede ser sustituir de 25 al 50 % de un sustrato orgánico comercial (Peat Moss) para favorecer el crecimiento de plántulas de jitomate.

### ➤ **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 en las condiciones usadas en este trabajo se puede secuestrar un 29% de C que eventualmente puede ser disipado a la atmósfera.

### ➤ **Económicas:**

El costo de producción del biochar por kilogramo se estimó muy preliminarmente en \$48.39 comparado con el costo de 70% por kg de Peat Moss. Esta diferencia de alrededor del 30% se puede concretar si todo el Peat Moss se reemplaza por biochar y se reduce en la medida que es necesario usar una mayor fracción de Peat Moss en la mezcla para hacerla viable en su aplicación en el crecimiento de plántulas.

Con base a lo anterior, es necesario hacer ajustes a las condiciones de operación de la pirólisis para hacer que el biochar resultante tenga propiedades más ad hoc para su empleo directo como sustrato agrícola. Los resultados de este trabajo sugieren la pertinencia de hacer ajustes de concentración de nutrientes y del pH para optimizar la formulación del biochar de uso directo.

## 10. 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.

## 11. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abad B., M., P. Noguera, y B. Carrión. (2004). Los sustratos en los cultivos sin suelo. In: Tratado de Cultivo Sin Suelo (Ed. Urrestarazu M). Mundi-Prensa. Madrid, España. pp: 113-158.
- Abrego J (2015), Procesos termoquímicos: obteniendo energía a partir de biomasa y residuos, Diario de Teruel.
- Adell A. (2007). Fundamentos de la Producción de Pastas Celulósicas, Tema 2, Análisis Químico de Materias Primas Fibrosas.
- Agilent Technologies, (2015), Resumen ejecutivo  
<https://www.agilent.com/cs/library/troubleshootingguide/public/technicaloverview-ICP-MS-guide-5994-0860es-es-agilent.pdf>
- Agrafioti E, Kalderis D, Diamadopoulos E (2014) Arsenic and chromium removal from water using biochars derived from rice husk, organic solid wastes and sewage sludge. *J Environ Manag* 133:309–314.
- Antal M, (2003), The Art, Science, and Technology of Charcoal Production, *Ind. Eng. Chem. Res.* 2003, 42, 1619-1640
- Amonette J.E., y Joseph S. (2009). Characteristics of Biochar: Microchemical Properties. En: *Biochar for Environmental Management*. Lehmann J. and Joseph S. Earthscan Publishing for a sustainable future: UK y USA. 33-52 p.
- Akhtar, A., & Sarmah, A. (2018). Novel biochar-concrete composites: Manufacturing, characterization and. *Sci. Total Environ.* , 408–416.
- APPA Madrid, <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*), IPICYT, benefits from biochar application to temperate soils: a review. *Plant and soil*, 337(1-2), 1-18.
- Baldock, J.A. (2007). Composition and cycling of organic carbon in soil. En: Marschner, P., Rengel, Z. (eds.), *Nutrient cycling in terrestrial ecosystems*, pp. 1-35. Springer. Berlin, Heidelberg, Alemania.
- Baker NR (2008) Chlorophyll fluorescence: a probe of photosynthesis in vivo. *Annu Rev Plant Biol* 59: 89–113.
- Benar P, Gonçalves A, Mandelli D, Schuchardt U. (1999). Eucalyptus organosolv lignins: study of the hydroxymethylation and use in resols. *Biores. Technol.* 68:11-16.
- Bergman, P. C. A. and J. H. A. Kiel. (2005). Torrefaction for biomass upgrading. Conference proceedings of 14th european biomass conference and exhibition. Paris, France. 17-21
- Bhagwanrao SV, Singaravelu M. (2014). Bulk density of biomass and particle density of their briquettes. *Int J Agric Eng*;7:221–4.
- Bhowmick D.B, Sarmah A, Sen R, (2018) Lignocellulosic biorefinery as a model for sustainable development of biofuels and value added products, *Bioresource Technology* 247 1144–1154.
- Brebu, M. and C. Vasile. (2010), Thermal degradation of lignin-A review. *Cellulose Chemistry and Technology* 44 (9): 353-363.
- Brewer, C., Chuang, V., Masiello, C., Gonnermann, H., Gao, X., Dugan, B., Driver, L., Panzacchi, P., Zygourakis, K. & Davies, C. (2014). New approaches to measuring biochar density and porosity. *Biomass and bioenergy*, 66, 176–185.
- Bridgeman, T. G., J. M. Jones, I. Shield and P. T. Williams, (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: Lehmann, J., Joseph, S. (Eds.). *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*, Earthscan, United Kingdom: 127–46.

- Brownsort P. (2009). Tesis de maestría: Biomass pyrolysis processes: performance parameters and their influence on biochar system benefits. University of Edinburgh. 84 p.
- Bustamante V, Carrillo A, Prieto J, Corral J, Ciro J, (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.
- Brantley K, Savin M, Brye K, Longer D, (2015) Pine Woodchip Biochar Impact on Soil Nutrient Concentrations and Corn Yield in a Silt Loam in the Mid-Southern U.S, *Agriculture*, 5, 30-47.
- Cao, Xuefei, Linxin Zhong, Xinwen Peng, Shaoni Sun, Shouming Li, Shijie Liu, and Runcang Sun. (2014). "Comparative Study of the Pyrolysis of Lignocellulose and Its Major Components: Characterization and Overall Distribution of Their Biochars and Volatiles." *Bioresource Technology* 155.
- Cetin, E., Moghtaderi, B., Gupta, R., Wall, T. F., (2004). Influence of pyrolysis conditions on the structure and gasification reactivity of biomass chars. *Fuel* 83: 2139-2150.
- CFE, Tarifas vigentes:  
<https://app.cfe.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/TarifasCREIndustria/Tarifas/GranDemandaMTO.aspx>
- Cheng J. (2009). Biomass to renewable energy processes. CRC Press.
- Chen Lopez, (2018), Rol del calcio en el cultivo de plantas, <https://www.pthorticulture.com/es/centro-de-formacion/rol-del-calcio-en-el-cultivo-de-plantas/>
- Chum, H., Faaij, A., Moreira, J., Berndes, G., Dhamija, P., Dong, H., Gabrielle, B., Goss E, Lucht, W., (2011) Bioenergy. En: IPCC special report on renewable energy sources and climate change mitigation.
- Cobbett, C. (2002). Phytochelatin and Metallothioneins: Roles in Heavy Metal Detoxification and Homeostasis. *Annual Review of Plant Biology*. 53: 159-182.
- Consejo Regulador de Mezcal, Sitio web: [crm.org.mx](http://crm.org.mx)
- Corato U, Bari I, Viola E, Pugliese M, (2018) Assessing the main opportunities of integrated biorefining from agrobioenergy 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., Koper, M. & Deng, Y.Y, (2012). The role of bioenergy in a fully sustainable global energy system. *Biomass and Bioenergy*, 41, pp.21-33.
- Creutzig, F. et al., (2015) Bioenergy and climate change mitigation: an assessment. *GCB Bioenergy*, 7(5), pp.916-944.
- Damien, A., (2010) La biomasa. Fundamentos, tecnologías y aplicaciones. AMV y Mundi-Prensa. España.
- Decloux M. Bories A. Lewyowski R. Fargues C. Mersad A. Lameloise M. Bonnet F. Dherbecourt B. Nieto L. (2002) Interest of electro dialysis to reduce potassium level in vinasses preliminary experiment. *Desalination* 146 *Bioresource Technology* 91 pp. 393-398.
- De Lucas A, Del Peso C, (2012). Biomasa, Biocombustible y Sostenibilidad, Ministerio de Educación Cultura y Deporte y cofinanciado por el Fondo Social Europeo,
- Delegación SADER San Luis Potosí, (2019), Mezcales Potosinos  
<https://www.gob.mx/agricultura/sanluispotosi/articulos/mezcales-potosinos?idiom=es>
- Demirbas A., *J. Anal. Appl.* (2004). Pyrolysis, 72, 215–219.
- Deng H, Yu H, Chen M, Ge C, (2014) Sorption of atrazine in tropical soil by biochar prepared from cassava waste. *BioResources* 9:6627–6643.
- Dispenza, V., Alonzo, G., De Pasquale, C., Calvo, S. (2014). Di Agraria Dipartimento Di Scienze Agrarie E Forestali. Università Degli Studi Di Palermo.
- Downey, M.O., Dokoozlian, N.K, Krstic, M.P. (2006). Cultural practice and environmental impacts on the flavonoid composition of grapes and wine: A review of recent research. *Am. J. Enol. Vitic.*, 57(3): 257-268.

- Downie, A., Crosky, A., Munroe, P., (2009). Physical properties of biochar. In: *Biochar for Environmental Management: Science and Technology* (Eds. Lehmann, J. & Joseph, S.), Earthscan.
- Dumroese, R. K., Heiskanen, J., Englund, K., & Tervahauta, A. (2011). *Biomass and bioenergy*, 35(5),
- Fanchini, C.R., Temer, B., Teixeira, M.C., Cano, E. (2010). Production of xylanolytic enzymes by *Penicillium janczewskii*. *Biores. Technol.* 101: 4139-4143.
- FAO (2008), [http://www.fao.org/ag/ca/training\\_materials/cd27-spanish/ba/organic\\_matter.pdf](http://www.fao.org/ag/ca/training_materials/cd27-spanish/ba/organic_matter.pdf)
- (FAO, 2015), <http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/clasificacion-de-suelos/sistemas-numericos/propiedades-quimicas/es/>).
- Faus Badia. Alejandro, (2010). *Sustratos alternativos para cultivos de exterior valorizacion de residuos organicos y ensayos. I curso de gestion de viverosa forestales.* Valencia-España.
- Favaroa L, Cagnina L, Basagliaa M, Pizzoccheroa V, Hebervan Zylb W, Casellaa S, (2017), Production of bioethanol from multiple waste streams of rice milling, *Bioresource Technology*, 244, (1), 151-159.
- Fengel D, G. Wegener, (1989). *Wood chemistry, ultrastructure, reactions*”, Walter de Gruyeter, Berlin, 613,
- Fonteno, D. (2009). *Sustratos: tipos y propiedades físicas químicas.* En: *Agua, sustratos y nutrición.* David W. Reed, Editor. Trad. M. Pizano. Hortitécnia, Bogotá. pp. 93-123.
- Gallo-Saravia M, Lugo-Sierra L, Barrera-Zapata R, (2018). Evaluación de biochar como alternativa de sustrato en cultivos de tomate, *Scientia et Technica Año XVIII*, 23(02). Universidad Tecnológica de Pereira
- García, C., Rosas, J., & Sánchez, M. (2014). *Enmiendas orgánicas de nueva generación: Biochar y otras biomoléculas.* Madrid (España): Ediciones Mundi-Prensa.
- Garrido T, Mendoza J y Richter P. (2004). Efecto de la materia orgánica soluble de los biosólidos sobre la desorción de cobre en suelos. *20*, 53-57. Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo.
- Gaskin, J. W., Steiner C., Harris K., Das K. C. y Bibens B. (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., & Schmidt, H.-P. (2012). Biochar in poultry farming. *Ithaka J.*, 262–264.
- Glaser, B., Balashov, E., Haumaier, L., Guggenberger, G. and Zech, W., (2000). Black carbon in density fractions of anthropogenic soils of the Brazilian Amazon region. *Organic Geochemistry* 31(7-8): 669-678.
- Graber, E. R., Harel, Y. M., Kolton, M., Cytryn, E., Silber, A., David, D. R., & Elad, Y. (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.P.; Glick, B.R. (2001). Ethylene and flooding stress in plants. *Plant Physiol. Biochem.* 39:1-9.
- Gomez-Rico M, Font F, Fullana, A, Martin-Gullon A, (2005). Thermogravimetric study of different sewage sludges and their relationship with the nitrogen content, *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 74 421–428.
- Gude JCJ, Rietveld LC, Van Halem D (2017) As (III) oxidation by MnO<sub>2</sub> during groundwater treatment. *Water Res* 111:41–51
- Gu, M., Li, Q., Steele, P. H., Niu, G., & Yu, F. (2013). Growth of ‘Fireworks’ gomphrena grown in substrates amended with biochar. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 11(1), 819-821.
- Hale SE, Arp HPH, Kupryianchyk D, Cornelissen G (2016). A synthesis of parameters related to the binding of neutral organic compounds to charcoal. *Chemosphere* 144:65–74.
- Haslett, B.S., R.J. Reid y Z. Rengel. (2001). Zinc mobility in wheat: uptake and distribution of zinc applied to leaves or roots. *Ann. Bot.* 87, 379-386
- Heredia E, (2014). Bagazos de Agave salmiana y Agave weberi utilizados como sustrato para producir *Pleurotus ostreatus*, <http://hdl.handle.net/20.500.11845/565>

- Hernández C., P. Cano R. y N. Rodríguez D. (2008). Uso de Sustratos Orgánicos para la Producción de Tomate en Invernadero. *Agric. Téc. Méx* 34 (1) 69-74
- Hoshi, T. (2001) 'Growth promotion of tea trees by putting bamboo charcoal in soil', in *Proceedings of 2001 International Conference on O-cha (Tea) Culture and Science*, Tokyo, Japan, pp147–150.
- Hossain MK, Strezov V, Chan KY, Ziolkowski A, Nelson PF, (2011). Influence of pyrolysis temperature on production and nutrient properties of wastewater sludge biochar, *J Environ Manage*, 92(1):223-8.
- Huang, Z.A., Jiang, D.A., Yang, Y., Sun, J.W. y JIN, S.H. (2004). Effects of nitrogen deficiency on gas exchange, chlorophyll fluorescence, and antioxidant enzymes in leaves of rice plants. *Photosynthetica*, 42: 357-364.
- Huang Y, Li F, Meng J, Chen W, (2018). Lignin Content of Agro-forestry Biomass Negatively Affects the Resultant Biochar pH, *BioResources* 13(3), 5153-5163.
- Huggins, T., Wang, H., Kearns, J., Jenkins, P., & Ren, Z. (2014). Biochar as a sustainable electrode material for electricity production in microbial fuel cells. *Bioresour. Technol*, 114–119.
- IberCib - Nuevas Tecnologías: [www.ibercib.es](http://www.ibercib.es).
- IEA. (2007). *World Energy Outlook (2007)* International Energy Agency.
- Inyang, M., Gao, B., Ding, W., Pullammanappallil, P., Zimmerman, A. R., & Cao, X. (2011). Enhanced lead sorption by biochar derived from anaerobically digested sugarcane bagasse. *Separation Science and Technology*, 46 (12), 1950–1956.
- Instruction manual for MINI-PAM-II, (2014), Manual for Touchscreen Operation.
- Jeffery, S., Verheijen, F.G.A., van der Velde, M., Bastos, A.C (2011). A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 144(1), 175-187.
- Joseph, S., Doug, P., Dawson, K., Mitchell, D., Rawal, A., James, H, Van Zwieten, L. (2015). Feeding biochar to cows: An innovative solution for improving soil fertility and farm. *Pedosphere*, 666–679.
- Jung, J, Hyun, (2013). Comparison of biochar properties from biomass residues produced by slow pyrolysis at 500 C, *Bioresource Technology* Volume 148, Pages 196-201.
- Kammann, C.I., Schmidt, H.-P., Messerschmidt, N., Linsel, S., Steffens, D., Müller, C., Koyro, H.-W., Conte, P., Joseph, S., (2015). Plant growth improvement mediated by nitrate capture in co-composted biochar. *Sci. Rep.* 5, 11080.
- Kan T, Strezov V, Evans TJ. (2016). Lignocellulosic biomass pyrolysis: a review of product properties and effects of pyrolysis parameters. *Renew Sustain Energy Rev* 57:1126–40.
- Kirkels, A., y G. Verbong. (2011) Biomass gasification: Still promising? A 30-year global overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1):471-481.
- Kim KH, Kim JY, Cho TS, Choi JW, (2012). Influence of pyrolysis temperature on physicochemical properties of biochar obtained from the fast pyrolysis of pitch pine (*Pinus rigida*). *Bioresour Technol*.118:158-62.
- Kwapinski, W., Byrne, C.M.P., Kryachko, E., Wolfram, P., Adley, C., Leahy, J.J., Novotny, E.H., Hayes, M.H.B. (2010). Biochar from biomass and waste. *Waste Biomass Valor.* 1: 177–89.
- Lam PS, Sokhansanj S, (2014). Engineering properties of biomass. In: Shastri Y, Hansen A, Rodríguez L, Ting KC, editors. *Engineering and science of biomass feedstock production and provision*. Springer New York. p. 17–35.
- Lal, R. (2010). Managing soils and ecosystems for mitigating anthropogenic carbon emissions and advancing global food security. *Bioscience* 60 (9): 708-721.
- Larson, E.D., (2008). Biofuel production technologies: status, prospects and implications for trade and development, in *United Nations Conference on Trade and Development, UNCTAD: New York and Geneva*. p. 41
- Lee, J., Kim, K.-H., & Kwon, E. (2017). Biochar as a Catalyst. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70-79.

- Lehmann, J. (2007). A handful of carbon. *Nature*, 447: 143–44.
- Lehmann J. and Joseph S. (2009). Biochar Production Technology. 127-146. En: *Biochar for Environmental Management.. Earthscan Publishing for a sustainable future: UK y USA*. 416 p.
- Lehmann, J., McBride, M. B., & Hay, A. G. (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, M, (2016), *Revista Calameo, Ingeniería de Proyectos Agrícolas*.
- Leskovar I, (2001), *Producción y ecofisiología del trasplante hortícola*, Horticultural Sciences Department, Texas Agricultural Experiment Station
- Lines, Kathya & Vásquez, William. (2006). Estudio de la germinación y la conservación de semillas de cedro maría (*Calophyllum brasiliense*). *Tecnología en Marcha*. 19.
- Liu, G. et al. (2011) "Making Fischer-Tropsch Fuels and Electricity from Coal and Biomass: Performance and Cost Analysis", *Energy&Fuels*, 25,415-437]
- Liu, X.H., Han, F.P., Zhang, X.C. (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.
- Lima, R. L.(2013). Evaluación de la composición química y propiedades físicas de madera y corteza de cuatro coníferas para la producción de bioenergía. Tesis Maestría. Universidad Autónoma de Nuevo León, 55.
- Luque R, Clark J, (2011). *Handbook of biofuels production* Woodhead Publishing Limited. 647
- Mariani, S.; (2000) *Química de la madera: conceptos básicos y reacciones*, Publicación docente No 40. UACH, Facultad de Ciencias forestales. 50 p.
- Marinova, S. (2009). The effects of heavy metals on seed germination and plant growth on alfalfa plant (*Medicago sativa*). *Bulg. J. Agri. Sci.*, 15 (4), 347–50.
- Martínez G, Íñiguez G, Donají Y, López-Cruz Y, Bautista M, (2013). Tiempos de apilado del bagazo del maguey mezcalero y su efecto en las propiedades del compost para sustrato de tomate, *Rev. Int. Contam. Ambie.* 29 (3) 209-216.
- Masera, O. (2006). *Bioenergy Use Patterns in Mexico*. De: *The International Seminar on Bioenergy and sustainable Rural Development*. Morelia, Michoacán, México.
- Maxwell K, Johnson GN (2000) Chlorophyll fluorescence – a practical guide. *J Exp Bot* 51, 659–668.
- Mittelbach M, (2015) Fuels from oils and fats: Recent developments and perspectives, 117, *European Journal Lipid Science and Technology* (11), 1832–1846.
- Mohan, D., Pittman, Jr., C. U. and Steele, P. H. (2006) 'Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: A critical review', *Energy and Fuels*, vol 20, pp848–889.
- 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.*
- Navarro R, Maldonado-Rodríguez R, Ariza D, (2004). Fluorescencia de la clorofila en cinco procedencias de "Pinus halepensis" Mill y su respuesta a estrés hídrico, ISSN 1575-2410, ISSN-e 2386-8368, N°. 17.
- NORMA Oficial Mexicana NOM-070-SCFI-2016, *Bebidas alcohólicas-Mezcal-Especificaciones*.
- NORMA Oficial Mexicana, NOM-021-RECNAT-2000, *Especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos*.
- Northup, J. (2013). *Biochar as a replacement for perlite in greenhouse soilless substrates*. Graduate Theses and Dissertations. Paper. Iowa State University.
- Novak, J. M., I. Lima, B. Xing, W. Gaskin, C. Steiner, K.C. Das, M. Ahmedna, D. Rehrh, D.W. Watts, W. J. Busscher, and H. Schomberg. (2009). Characterization of designer biochar produced at different temperatures and their effects on a loamy sand. *Ann. Environ. Sci.* 3: 195-206.

- Pastor-Villegas, J., Pastor-Valle, J. P., Meneses Rodríguez, J. M., and García García, M., (2006). Study of commercial wood charcoals for the preparation of carbón.
- Petter, F. A., Marimon Junior, B. H., Andrade, F. R., Schossler, T. R., Gonçalves, L. G., & Marimon, B. S. (2012). Biochar conditioner as substrate for the production of lettuce. *Revista Agrarian*, 5(17), 243-250.
- Planeación Agrícola Nacional (2017-2030) <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/257066/Potencial-Agave-Tequilero-y-Mezcalero.pdf>.
- Porta C., J., M. López-Acevedo R. y R. M. Poch C. (2014). *Edafología: Uso y protección de suelos*. 3a edición. Mundi-Prensa. Madrid, España. 607 p.
- Prado-Martínez M, Anzaldo-Hernández J, Becerra-Aguila B, Palacios-Juárez H, (2012). Caracterización de hojas de mazorca de maíz y de bagazo de caña para la elaboración de una pulpa celulósica mixta, *Madera y Bosques* 18(3), 37-51.
- Quintero, C., Fernanda, M., Guzmán, P., Miguel, J., & Valenzuela, J. L. (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*, Departamento de Ciencias Agrarias y del Medio Natural Instituto Universitario de Investigación en Ciencias Ambientales de Aragón (IUCA).
- REMBIO, (2011) Estado del arte de la bioenergía en México.
- Richter F, Fricke T, Wachendorf M. (2010) Utilization of semi-natural grassland through integrated generation of solid fuel and biogas from biomass. *Sci* 2010;65:185–99.
- Rivera R, Martínez C, Morales S, (2013). Evaluación de residuos agrícolas como sustrato para la producción de *Pleurotus ostreatus*, ISSN 1909-2474.
- Routray K, Barnett J, Huber G, (2017) Hydrodeoxygenation of Pyrolysis Oils *Energy Technol.* 2017, 5, 80 – 93.
- Rowell, R. M. (2012). *Handbook of wood chemistry and wood composites*. CRC press. Boca Ratón, FL, USA. 703 p.
- Rutherford, D.W.; Wershaw, R.L.; Cox, L.G. (2004). Changes in Composition and Porosity Occurring During the Thermal Degradation of Wood and Wood Components; Scientific Investigations Report 2004-5292; United States Geological Survey.
- SAGARPA, (2013). Consultado en: <http://2006-2012.sagarpa.gob.mx/agricultura/Paginas/Agricultura-Protegida2012.aspx>.
- SAGARPA, (2017), Planeación agrícola nacional, jitomate mexicano.
- Sanchez-Monederoa M.A, Cayuelaa M.L, Roiga A, Jindob K, Mondinic C, Boland N, (2018), Role of biochar as an additive in organic waste composting, *Bioresource Technology* 247, 1155–1164.
- Saucedo-Luna J, Castro-Montoya 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* volume 38, pages725–732.
- Secretaría de Economía, (2015). 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 Secretaría de energía, ANBIO.
- SENER-BID-GTZ, (2016). Sistema de Información Energética.
- Song, X. D., Xue, X. Y., Chen, D. Z., He, P. J., & Dai, X. H. (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, *Rev Soc Quím Perú*. 85(2).
- Tan G, Sun W, Xu Y, Wang H, Xu N (2016) Sorption of mercury (II) and atrazine by biochar, modified biochars and biochar based activated carbon in aqueous solution. *Bioresour Technol* 211:727–735.
- Tian, Y., Sun, X., Li, S., Wang, H., Wang, L., Cao, J., & Zhang, L. (2012). *Scientia Horticulturae*, 143, 15-18.
- Thyrel, M., R. Samuelsson, M. Finell and T. A. Lestander. (2013). Critical ash elements in biorefinery feedstock determined by X-ray spectroscopy. *Applied Energy* 102: 1288–1294. 202–10.
- Tomas A, (2015). Tesis doctoral, Utilización De Medidas De Fluorescencia De La Clorofila Para Monitorizar El Estado Nutricional Y Estimar El Potencial Enológico En Viñedos Afectados Por Clorosis Férrica, Universidad de Valladolid, Escuela Técnica Superior De Ingenierías Agrarias.
- Ullua A, Gutierrez E, (2010) Cuaderno de Trabajo: Elaboración de Pinole, Universidad Multicultural, Colombia.
- Ungureanu G, Santos S, Boaventura R, Botelho C (2015). Arsenic and antimony in water and wastewater: overview of removal techniques with special reference to latest advances in adsorption. *J Environ Manag* 151:326–342
- Urien A, Lopez F, Alguacil F, (2013). Obtención de biocarbones y biocombustibles mediante pirólisis de biomasa residual, Universidad Nacional de Educación a Distancia, Facultad de Ciencias, Departamento de Ciencias Analíticas.
- Varela S, Arana V, (2011). Serie técnica: Sistemas Forestales Integrados Área Forestal - INTA EEA Bariloche Sección: "Silvicultura en vivero" Varela, S. A. y Aparicio, A. (eds.) Cuadernillo N° 3. ISSN: 1853-4775
- Vassilev S, Baxter D, Andersen L, Vassileva C, (2010). An overview of the chemical composition of biomass, *Fuel*, 89, 913–933.
- Vaughn, S. F., Kenar, J. A., Thompson, A. R., & Peterson, S. C. (2013). *Industrial Crops and Products*, 51, 437-443.
- Vaughn, S. F., Kenar, J. A., Eller, F. J., Moser, B. R., Jackson, M. A., & Peterson, S. C. (2015). *Industrial Crops and Products*, 66, 44-51.
- Vega A, Franco H, (2012). Análisis de cenizas y minerales de hongos comestibles *Pleurotus* spp., cultivados sobre paja de arroz (*Oryza sativa*), tuza y rastrojo de maíz (*Zea mayz*). *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*.
- Wang, M., & Zhu, Y. (2018). Review on utilization of biochar for metal-contaminated soil. *JOURNAL OF ENVIRONMENTAL SCIENCES*, 156 – 173.
- Warren C. (2012). Tesis de maestría: The Effects of Biochar Amendment to Soil on Bioenergy Crop Yield and Biomass Composition. University of Tennessee, Knoxville. 96 p.
- Weber, K., & Quicker, P. (2018). Properties of biochar. *Fuel*, 240-261.
- Wilches Rojas, F., Álvarez Herrera, J., & Balaguera López, H. (2008). Tamaños de alvéolo y diferentes láminas de riego en obtención de plantulas de tomate. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 11(2), 141-151.
- Wise, L.E., M. Marphy y A. d'Adieco. (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, Shuzhen Z, Wen Yong W y Honglu L (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.
- Xinni Xiong a, I. K. (2017). A review of biochar-based catalysts for chemical synthesis, biofuel. *Bioresource Technology*, 254–270.

- Xu F, Yu J, Tesso T, Dowell F, Wang D. (2013). Qualitative and quantitative analysis of lignocellulosic biomass using infrared techniques: a mini-review. *Appl Energy* 104:801–9.
- Yang Yang, Shaoqiang Ma, Yi Zhao, Ming Jing, Yongqiang Xu, Jiawei Chen, (2015), A Field Experiment on Enhancement of Crop Yield by Rice Straw and Corn Stalk-Derived Biochar in Northern China, sustainability, ISSN 2071-1050
- Yokoyama Y, Tanaka K, Takahashi Y (2012) Tesis “Differences in the immobilization of arsenite and arsenate by calcite”. *Geochim Cosmochim Acta* 91:202–219.
- You. S, Sik Ok Y, Season S. Tsang W, Eilhann E, Hwa Wang, C, (2017). A critical review on sustainable biochar system through gasification: Energy and environmental applications, *Bioresource Technology* 246 242–253
- Zárate M, (2014), Manual de hidroponía, Universidad Nacional Autónoma De México.
- Zhang W, Zheng J, Zheng P, Qiu R (2015) Atrazine immobilization on sludge derived biochar and the interactive influence of coexisting Pb(II) or Cr(VI) ions. *Chemosphere* 134:438–4.
- Zwieten L. Van, Kimber S, Morris S, Chan K, Downie A, Rust J, Joseph K, Cowie A, (2010). Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility, *Plant Soil* 327:235–246.

## 12. ANEXO A: Datos experimentales obtenidos de la síntesis por lotes de biochar

Lote	Fecha	Producto	Condiciones de operación		Máximos de rxn		
		W biochar	v He inicial	v He final	v He maximo	Tiempo	T max
		g	ccm	ccm	ccm	min	C
1	11/09/2019	22	85.71	0.00	278.35	26	260
2	12/09/2019	21	95.74	40.36	923.08	30	325
3	13/09/2019	20	107.57	0.00	543.62	28	301
4	17/09/2019	19	108.43	0.00	203.77	33.00	346
5	18/09/2019	17	103.25	69.77	308.60	30	326
6	19/09/2019	17	91.22	77.47	364.86	30	331
7	20/09/2019	16	91.37	49.77	380.28	30	330
8	23/09/2019	20.4	105.06	54.88	337.50	30	327
9	23/09/2019	16.6	105.47	0.00	116.13	30	327
10	23/09/2019	17.7	105.88	9.90	270.00	23	224
11	24/09/2019	14.4	95.74	74.18	263.41	30	313
12	24/09/2019	21	100.37	68.18	327.21	30	341
13	24/09/2019	14.7	101.89	97.83	271.36	28	299
14	25/09/2019	19.9	114.65	77.81	298.34	25	272
15	25/09/2019	20.1	118.94	90.60	377.32	25	242
16	25/09/2019	20.3	128.57	106.30	360.00	25	264
17	26/09/2019	19.5	101.31	0.00	382.62	25	277
18	26/09/2019	19	132.35	67.08	295.08	25	275
19	26/09/2019	20.4	121.90	97.65	306.82	25	251
20	01/10/2019	20.5	105.26	0.00	167.70	25	279
21	01/10/2019	20.4	108.65	67.08	295.08	25	275
22	01/10/2019	20.6	121.90	97.65	306.82	25	251
23	02/10/2019	18.3	113.21	98.00	409.90	25	252
24	02/10/2019	19.3	125.00	114.65	346.15	25	269
25	02/10/2019	20.8	128.27	128.27	279.79	25	269

### 13. ANEXO B: Datos experimentales obtenidos de pruebas funcionales

Tratamiento	Días	Altura mm	S.D	Diámetro mm	S.D	Longitud de hoja mm	S.D	Longitud de raíz mm	S.D	PF g	S.D	PS g	S.D	Biomasa	S.D	Clorofila	S.D
S100	15	49.76	5.31	1.38	0.26	21.64	5.46	64.01	22.17	0.20	0.07	0.03	0.01	8.12	1.07	0.77	0.03
S100	15	52.83		1.20		19.95		10.46		0.26		0.03		8.50		0.77	
S100	15	51.65		0.98		20.66		64.91		0.25		0.03		7.51		0.79	
S100	15	40.29		0.74		8.45		51.11		0.08		0.01		7.32		0.73	
S100	15	44.26		1.29		15.38		45.04		0.15		0.01		10.00		0.73	
S75	15	38.16	4.74	0.53	0.14	11.51	2.24	73.97	7.21	0.11	0.05	0.02	0.01	5.26	0.42	0.78	0.05
S75	15	41.39		0.82		7.34		63.88		0.13		0.03		4.50		0.80	
S75	15	29.99		0.71		6.61		61.19		0.13		0.02		5.46		0.80	
S75	15	39.17		0.88		11.08		78.69		0.24		0.05		4.57		0.75	
S75	15	41.59		0.83		7.97		67.45		0.17		0.03		4.98		0.68	
S50	15	29.90	3.72	0.51	0.15	0.00	0.00	39.01	10.88	0.04	0.01	0.01	0.00	4.98	0.54	0.00	0.00
S50	15	28.01		0.60		0.00		15.02		0.03		0.01		5.40		0.00	
S50	15	21.83		0.67		0.00		19.03		0.02		0.00		6.08		0.00	
S50	15	21.48		0.28		0.00		16.61		0.02		0.00		4.74		0.00	
S50	15	24.65		0.59		0.00		11.35		0.02		0.00		5.67		0.00	
S25	15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
S25	15	0.00		0.00		0.00		0.00		0.00		0.00		0.00		0.00	
S25	15	0.00		0.00		0.00		0.00		0.00		0.00		0.00		0.00	
S25	15	0.00		0.00		0.00		0.00		0.00		0.00		0.00		0.00	
S25	15	0.00		0.00		0.00		0.00		0.00		0.00		0.00		0.00	
S0	15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
S0	15	0.00		0.00		0.00		0.00		0.00		0.00		0.00		0.00	
S0	15	0.00		0.00		0.00		0.00		0.00		0.00		0.00		0.00	
S0	15	0.00		0.00		0.00		0.00		0.00		0.00		0.00		0.00	
S0	15	0.00		0.00		0.00		0.00		0.00		0.00		0.00		0.00	

S100	30	94.65	7.95	1.90	0.14	24.27	2.82	245.00	11.65	1.37	0.35	0.18	0.03	7.45	0.58	0.73	0.05
S100	30	82.61		1.89		29.36		238.00		1.54		0.19		8.32		0.63	
S100	30	72.75		2.02		28.56		215.00		1.78		0.21		8.53		0.62	
S100	30	80.58		2.21		32.09		228.00		1.72		0.21		8.03		0.69	
S100	30	79.75		2.14		27.85		225.00		2.29		0.25		9.02		0.62	
S75	30	56.73	3.64	1.59	0.14	22.37	1.01	126.50	16.15	1.07	0.06	0.12	0.01	8.88	0.50	0.75	0.05
S75	30	51.30		1.51		21.83		112.00		1.14		0.15		7.59		0.73	
S75	30	56.57		1.73		22.92		136.00		1.02		0.13		8.11		0.65	
S75	30	51.59		1.51		20.47		124.00		1.04		0.12		8.67		0.75	
S75	30	59.72		1.82		20.90		94.00		0.98		0.12		8.40		0.68	
S50	30	35.90	3.45	1.04	0.22	14.56	1.69	106.00	5.86	0.40	0.06	0.04	0.01	10.47	0.52	0.70	0.09
S50	30	45.66		1.16		16.38		98.00		0.44		0.05		9.57		0.71	
S50	30	40.95		1.46		15.28		113.00		0.34		0.04		9.60		0.55	
S50	30	40.81		1.45		17.86		102.00		0.48		0.05		9.43		0.55	
S50	30	40.80		0.99		18.58		109.00		0.36		0.03		10.47		0.55	
S25	30	23.73	2.04	0.76	0.05	2.88	1.28	56.00	14.36	0.06	0.02	0.01	0.00	7.50	0.46	0.00	0.00
S25	30	25.71		0.71		0.00		32.00		0.04		0.01		6.56		0.00	
S25	30	22.94		0.69		2.90		49.00		0.06		0.01		7.23		0.00	
S25	30	26.34		0.63		2.87		52.00		0.06		0.01		6.59		0.00	
S25	30	28.01		0.72		2.78		72.00		0.10		0.01		7.46		0.00	
S0	30	26.06	3.71	0.61	0.12	0.00	0.00	27.00	4.15	0.03	0.01	0.01	0.00	5.88	1.05	0.00	0.00
S0	30	27.70		0.59		0.00		23.00		0.04		0.01		5.48		0.00	
S0	30	31.23		0.88		0.00		31.00		0.06		0.01		6.12		0.00	
S0	30	21.95		0.62		0.00		21.00		0.05		0.01		8.20		0.00	
S0	30	23.08		0.66		0.00		29.00		0.05		0.01		6.25		0.00	
S100	45	85.11	41.25	2.99	1.23	29.15	13.70	130.84	61.39	2.11	1.00	0.29	0.13	7.38	3.50	0.54	0.24
S100	45	85.12		2.64		31.50		126.51		2.09		0.30		6.92		0.54	
S100	45	99.68		2.56		29.36		141.04		1.73		0.23		7.46		0.49	
S100	45	94.75		2.69		32.01		146.20		2.61		0.29		8.85		0.58	
S100	45	0.00		0.00		0.00		0.00		0.00		0.00		0.00		0.00	

S75	45	72.99	4.63	2.45	0.16	27.58	2.00	127.86	4.24	1.58	0.51	0.22	0.04	7.27	0.89	0.63	0.05
S75	45	69.97		2.30		25.54		127.73		2.46		0.28		8.83		0.74	
S75	45	68.26		2.45		26.45		120.10		2.55		0.29		8.93		0.66	
S75	45	79.31		2.09		23.18		121.90		1.42		0.19		7.33		0.64	
S75	45	68.32		2.20		23.06		129.90		2.01		0.28		7.19		0.66	
S50	45	52.46	27.93	1.71	0.97	22.22	12.49	109.21	57.64	0.97	0.49	0.13	0.07	7.54	4.06	0.66	0.34
S50	45	47.99		1.76		22.70		102.60		0.81		0.11		7.43		0.64	
S50	45	52.20		1.84		23.45		103.62		0.88		0.12		7.24		0.58	
S50	45	0.00		0.00		0.00		0.00		0.00		0.00		0.00		0.00	
S50	45	0.00		0.00		0.00		0.00		0.00		0.00		0.00		0.00	
S25	45	31.12	6.94	1.05	0.16	12.32	1.18	53.39	16.02	0.13	0.06	0.02	0.01	6.86	0.58	0.49	0.07
S25	45	27.08		1.00		13.74		55.02		0.16		0.02		7.29		0.42	
S25	45	43.88		1.17		14.85		60.36		0.27		0.04		6.72		0.49	
S25	45	26.87		0.80		14.35		85.59		0.14		0.02		6.89		0.59	
S25	45	31.42		0.82		12.23		84.63		0.18		0.03		5.73		0.43	
S0	45	21.91	1.40	0.79	0.11	10.66	2.49	88.89	6.62	0.11	0.03	0.02	0.01	6.77	0.43	0.55	0.05
S0	45	24.29		0.56		12.54		77.10		0.12		0.02		6.20		0.43	
S0	45	25.11		0.86		6.90		90.03		0.09		0.02		5.61		0.43	
S0	45	25.40		0.76		13.01		75.56		0.16		0.03		6.11		0.43	
S0	45	23.55		0.72		12.22		81.89		0.17		0.03		5.92		0.49	