



UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA

Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias

**Efectos de enmiendas de biochar
sobre el desarrollo en *Cucumis
sativus* L. Var. SMR-58**

Tesis

que para obtener el grado de

**Maestro en Ciencias en Biosistemática
y Manejo de Recursos Naturales y
Agrícolas**

Presenta

Carla Cristina Martínez Chávez

**Julia Zañudo Hernández
DIRECTOR**

Zapopan, Jalisco

8 de Julio de 2015



UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA

Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias

Efectos de Enmiendas de Biochar sobre el desarrollo en *Cucumis sativus* L. Var. SMR-58

Por

Biol. Carla Cristina Martínez Chávez

Maestría en Ciencias en Biosistemática y Manejo de Recursos Naturales y Agrícolas

Aprobado por:



Dra. Julia Zañudo Hernández
Director de Tesis e integrante del jurado

15 junio 2015
Fecha



Dr. Ramón Rodríguez Macías
Asesor del Comité Particular e integrante del jurado

15 JUNIO-2015
Fecha

Blanca C. Ramírez

Dra. Blanca Catalina Ramírez Hernández
Asesor del Comité Particular e integrante del jurado

15 junio 2015
Fecha



M en C. Javier Eugenio García de Alba Verduzco
Asesor del Comité Particular e integrante del jurado

15-jun-2015
Fecha



Dr. Eduardo Salcedo Pérez
Sinodal e Integrante del jurado

15 - JUN - 2015
Fecha

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo otorgado con la beca para la realización de mi posgrado.

Al Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias de la Universidad de Guadalajara, por permitirme llevar a cabo los estudios de Maestría.

Muy especial agradecimiento a mi Directora la Dra. Julia Zañudo Hernández, por su dirección y guía, conocimientos, comprensión, por el apoyo económico durante toda la tesis y por ser un gran ser humano. De la misma manera agradezco especialmente a mi asesor Dr. Ramón Rodríguez Macías por sus conocimientos y asesoría, tiempo, comprensión, apoyo económico, por el préstamo de instalaciones de invernadero, de laboratorio y equipo y por su responsabilidad como profesor.

A los otros miembros de mi Comité: la Dra. Blanca Ramírez y el M en C. Javier García, por sus aportaciones realizadas al trabajo.

Muy agradecida con el Dr. Eduardo Salcedo del Departamento de Madera, Celulosa y Papel del CUCEI, por su guía, recomendaciones y por facilitar el préstamo de equipo.

Agradezco también al Dr. José Anzaldo Hernández del Departamento de Madera, Celulosa y Papel del CUCEI, por su apoyo con equipo para realizar el análisis proximal del biochar y por los análisis químicos de lignina, celulosas, hemicelulosas, extraíbles y cenizas realizados en su laboratorio.

A la Dra. Alma Rosa Saucedo del Departamento de Madera, Celulosa y Papel del CUCEI por el préstamo de su Lab. Tecnología del Papel, y a la Dra. Martha Isabel Torres por el préstamo de instalaciones de invernadero.

Al Dr. Jesús Vargas del Departamento de Madera, Celulosa y Papel del CUCEI, por el préstamo de equipo.

De la misma manera, no se hubiera podido seguir con el trabajo sin el apoyo en instalaciones de invernadero del maestro José Sánchez Martínez, así como por sus recomendaciones.

A los maestros Gabriel Rodríguez, Ricardo Solís y Pablo Torres, siempre amables por su comprensión, apoyo y recomendaciones.

A la Dra. Catherine Brewer de la New Mexico State University, por su ayuda y recomendaciones.

Al Dr. Inocencio Higuera Ciapara, Director General del CIATEJ, por su apoyo.

Finalmente mi más sincero agradecimiento a mis colegas, amigos, primos y mi tía que me apoyaron y ayudaron con el trabajo más pesado, por aguantar los múltiples momentos llenos de tierra, carbón y soportar altas temperaturas, desveladas y hambre, así como por los ratos de risa: Alberto Vega, José Flores, Nemesio Javier Flores, Cindy Martínez, Manuel, Fernanda Chávez, Liam Cervantes y Rosario Gutiérrez.

Y a todos aquellos que de alguna manera me apoyaron para sacar adelante esta Tesis, mi más sincero agradecimiento.

DEDICATORIAS

A mis papás, por su ejemplo de trabajo y dedicación, por enseñarme a perseverar por mis sueños y objetivos, por siempre estar ahí para apoyarme y por ser unos grandiosos seres humanos.

En especial a mi papá (SNI III) porque sin él esta Tesis no hubiera sido llevada a cabo, pues fue quien diseñó y construyó el reactor para la producción del biochar.

En especial a mi mamá, por ser siempre comprensiva y por su apoyo incondicional.

A mi hermano, por sus recomendaciones.

A mi novio Alberto Vega, por su comprensión, amor y apoyo.

Muy especial a mi abuelita María Cristina (Pinochita), que ya está en el cielo, por sus enseñanzas, sabiduría, por ser una gran mujer y por la maravillosa herencia del amor y fortaleza que me dejó.

	Páginas
CONTENIDO	i
INDICE DE TABLAS	iii
INDICE DE FIGURAS	iv
RESUMEN	v
ABSTRACT	vi
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	4
2.1. La degradación de los suelos en México	4
2.2. Historia del biochar	6
2.3. Procesos de conversión termoquímica	8
2.4. Efecto de enmiendas de biochar sobre cultivos agrícolas	9
2.5. Importancia y descripción de la especie en estudio	11
2.5.1. Las Hortalizas y el cultivo de pepino en México	11
2.5.2. Generalidades del pepino (<i>Cucumis sativus</i> L.)	13
2.5.3. Especie a evaluar	14
2.6. Generación y aprovechamiento de residuos agroindustriales	15
2.7. Materia prima y sus efectos en el producto del biochar	17
3. HIPÓTESIS	19
4. OBJETIVO	19
5. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
6. MATERIALES Y MÉTODOS	20
6.1. Sitio de Estudio	20
6.2. Residuos agroindustriales	20
6.3. Caracterización de los residuos agroindustriales	20
6.4. Método de producción de biochar	20
6.5. Determinación de las características físicas y químicas en los diferentes tipos de biochar.	21
6.5.1. Análisis físicos de Biochar	21
6.5.2. Análisis químicos de Biochar	21
6.6. Evaluación biológica	24
6.6.1. Experimento 1. Etapa de evaluación en charola.	24

6.6.2. Experimento 2. Etapa de evaluación en maceta.	26
6.7. Análisis Estadísticos.	28
7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	29
7.1. Caracterización química de residuos agroindustriales	29
7.2. Rendimiento de biochar	30
7.3. Caracterización química de biochar	32
7.3.1. Análisis proximal de biochar	32
7.3.2. pH de biochar	33
7.3.3. C.E. de biochar	34
7.3.4. CIC y cationes intercambiables de biochar	35
7.3.5. Nutrientes en biochar	37
7.4. Caracterización física del biochar	39
7.4.1. Densidad aparente y real de biochar	39
7.5. Experimento 1. Etapa de evaluación en charola	41
7.5.1. Efecto de sustratos (biochar y peat moss) en el desarrollo vegetativo de plántulas de pepino.	41
7.5.2. Determinación de clorofilas en unidades SPAD	46
7.5.3. Nutrientes en hojas y tallos de pepino (Biochar y Peatmoss)	48
7.6. Experimento 2. Etapa de evaluación en maceta	51
7.6.1. Materia orgánica en suelos enmendados por biochar	51
7.6.2. CIC en suelos enmendados por biochar	52
7.6.3. Agua disponible en la mezcla de suelo franco arenoso con biochar en diferentes proporciones	54
7.6.4. Densidad aparente y real de la mezcla de suelo franco arenoso con biochar en diferentes proporciones	55
7.6.5. Efecto de enmiendas de biochar en el desarrollo vegetativo de plántulas de pepino.	57
7.6.6. pH y C.E. de lixiviados de enmiendas de biochar	62
7.6.7. Determinación de clorofilas en unidades SPAD	63
7.6.8. Nutrientes en hojas y tallos de pepino (Enmiendas de biochar)	65
8. CONCLUSIONES	68
9. REFERENCIAS	70

INDICE DE TABLAS	Páginas
Tabla 1. Humedad, extraíbles totales, lignina de residuos agroindustriales, celulosa, hemicelulosas y cenizas de viruta de álamo (Álamo), olote (Olote) y bagazo de agave (Agave).	30
Tabla 2. Rendimiento promedio de biochar de los residuos agroindustriales de bagazo de agave, viruta de álamo y olote.	31
Tabla 3. Análisis proximal (Humedad, Cenizas, materia volátil y carbono fijado) y relación carbono/ nitrógeno (C/N) de tres sustratos de biochar: viruta de álamo, olote y bagazo de agave.	33
Tabla 4. pH y conductividad eléctrica (C.E.) de biochar de viruta de álamo, olote y bagazo de agave.	34
Tabla 5. Macronutrientes (K, Na, Ca, Mg, N y P), micronutrientes (Cu, Zn, Fe y Mn), Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) y cationes intercambiables (CIN) de K, Na, Ca y Mg) de los de biochar de álamo, olote y agave.	38
Tabla 6. Densidad aparente y densidad real promedios; de biochar de viruta de álamo, olote y bagazo de agave.	40
Tabla 7. Altura, diámetro de tallo y longitud de raíz de plántulas de pepino; pH y conductividad eléctrica de lixiviados del 27 de febrero de 2014.	43
Tabla 8. Macronutrientes en hojas de pepino del 20 de Marzo de 2014.	49
Tabla 9. Micronutrientes en hojas de pepino del 20 de marzo de 2014.	50
Tabla 10. Materia orgánica (MO), cationes intercambiables (CIN) de K, Na, Ca y Mg y Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC), del control (Suelo franco arenoso) y de la mezcla de suelo franco arenoso con biochar en diferentes proporciones.	54
Tabla 11. Arena, arcilla, limo, textura (Franco arenoso), agua disponible (Agua Disp.), densidad aparente (Da) y densidad real (Dr) del control (Suelo franco arenoso) y de la mezcla de suelo franco arenoso con biochar en diferentes proporciones.	56
Tabla 12. Altura y diámetro de tallo; longitud, volumen y peso de raíz de plántulas de pepino; pH y conductividad eléctrica de lixiviados del 8 de abril de 2014.	60
Tabla 13. Macronutrientes de hojas de pepino del 8 de abril de 2014.	66
Tabla 14. Micronutrientes de hojas de pepino del 8 de abril de 2014.	67

INDICE DE FIGURAS

	Páginas
Figura 1. Peso seco en gramos. a) Tallos y hojas promedio de plántulas de pepino del 27 de febrero de 2014. b) Tallos y hojas promedio de plántulas de pepino del 20 de marzo de 2014, con fertilizante.	44
Figura 2. Peso de raíz en gramos (g) promedio de plántulas de pepino del 27 de febrero de 2014	45
Figura 3. Volumen (mL) promedio de raíz de pepino del 27 de febrero de 2014.	45
Figura 4. Clorofila (SPAD) promedio de plántulas de pepino del 25 de febrero de 2014.	47
Figura 5. Clorofila (SPAD) promedio de plántulas de pepino del 19 de marzo de 2014.	47
Fig. 6. Peso seco de tallos y hojas promedio de plántulas de pepino del 8 de abril de 2014.	61
Fig. 7. Peso seco de raíces promedio de plántulas de pepino del 8 de abril de 2014.	62
Fig. 8. Volumen de raíces promedio de plántulas de pepino del 8 de abril de 2014.	62
Fig. 9. Clorofila (SPAD) promedio de plántulas de pepino del 7 de abril de 2014.	64

RESUMEN

El desarrollo de tecnologías agrícolas que incrementen la productividad de los cultivos sin daños al ambiente, especialmente al suelo, es esencial. Una propuesta para mejorar la fertilidad edáfica, es la aplicación de enmiendas orgánicas. El biochar es considerado una de las enmiendas orgánicas con gran potencial para mejorar la fertilidad física y química de los suelos y se obtiene a partir de la transformación de diferentes materiales, con diferentes métodos entre ellos por medio de pirólisis. El biochar, mejora el pH, la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC), la capacidad de retención de agua; y además retiene y mejora la disponibilidad de los nutrientes en el suelo como N y P. El objetivo de este trabajo fue evaluar tres enmiendas de biochar, utilizando residuos agroindustriales; bagazo de agave (A), viruta de madera de álamo (M) y olote (O), sobre el desarrollo de plantas de pepino (*Cucumis sativus* L. cv SMR-58). Previo a la pirólisis lenta, a los materiales (A,M,O) se les determinó el contenido de humedad, lignina, celulosas, hemicelulosas, extraíbles y cenizas, así como el rendimiento de transformación en biochar. A los materiales obtenidos como biochar, se les caracterizaron las propiedades físicas y químicas más importantes. Posteriormente se realizaron dos experimentos para evaluar el efecto de mezclas en diferentes proporciones de biochar/peatmoss y biochar/suelo en el desarrollo de las plantas. El desarrollo de las plántulas, se registró en un primer experimento a los 43 días de la siembra; en el segundo, se evaluaron las plantas a los 31 días después de su trasplante. En ambos casos se midió la altura y el diámetro del tallo; la longitud, peso seco y volumen de la raíz; el peso seco de hojas y tallos; el pH y la C.E. de los lixiviados; los nutrientes en tallos y hojas, y unidades SPAD en hojas. En el primer experimento, el biochar de agave y de olote fueron efectivos como aditivos, ya que mejoraron el sustrato de peatmoss y con ello el desarrollo de la planta de pepino, pues incrementaron significativamente la disponibilidad de los nutrientes del fertilizante y por tanto los macronutrientes en las hojas y tallos, el peso seco de hojas, tallos y de raíz, la altura y el diámetro del tallo y el volumen de la raíz. Además el biochar de agave incrementó significativamente el pH de los lixiviados, creando un pH más cercano al óptimo para la planta de pepino. En el segundo experimento, las enmiendas de biochar, incrementaron significativamente los cationes intercambiables del suelo, pero no hubo cambios significativos en la CIC, materia orgánica, agua disponible, densidad aparente y la real. Las enmiendas de agave comparadas con las de olote, álamo y el control, tuvieron un efecto significativo en el desarrollo de las plantas de pepino, particularmente en la altura del tallo y el volumen de raíz. El análisis nutrimental en hojas y tallos mostró variación en los tratamientos de ambos experimentos. Por lo anterior, se concluyó que el biochar de agave fue la mejor enmienda para mejorar las características del suelo y para el desarrollo de la planta de pepino.

ABSTRACT

The development of agricultural technologies that increase crop productivity without harm to the environment, especially the soil is essential. A proposal to improve soil fertility, is the application of organic amendments. Biochar is considered one of the organic amendments with great potential to improve the physical and chemical fertility of soils and it is obtained from the processing of different materials, with different methods including pyrolysis. Biochar improves pH, cation exchange capacity (CEC), the water holding capacity; and improves the retention and availability of soil nutrients such as nitrogen and phosphorus. The aim of this study was to evaluate three amendments of biochar, using agro-industrial wastes; agave bagasse (A), poplar wood chip (M) and corn cob (O) on the development of cucumber plants (*Cucumis sativus* L. cv SMR-58). Prior to the slow pyrolysis of the materials (A, M, O), moisture content, lignin, cellulose, hemicellulose, extractives and ash, as well as the yield of transformation to biochar were determined. The most important physical and chemical properties were characterized for these biochar. Subsequently two experiments were performed to evaluate the effect of mixtures of biochar/peatmoss and biochar/soil in different proportions on plant growth. The seedling development was recorded in a first experiment, 43 days after planting; in the second experiment, the plants were evaluated 31 days after transplanting. In both cases the height and stem diameter were measured; length, dry weight and root volume; dry weight of leaves and stems; pH and C.E. leachate; nutrients in leaves and stems, and leaves SPAD units. In the first experiment, agave bagasse and corn cob biochar were effective as additives as they improved the peatmoss substrate and thus the development of the cucumber plant, therefore increased significantly the availability of the fertilizer nutrients and thus the macronutrients in the leaves and stems, dry weight of leaves, stems and root, the height and diameter of the stem and root volume. Moreover agave bagasse biochar addition significantly increased the pH of the leachate, creating a pH similar to the optimal for cucumber plants. In the second experiment, biochar amendments significantly increased soil exchangeable cations, but there were no significant changes in the CIC, organic matter, water available, bulk and real density. Agave amendments compared with corn cob, poplar chips and control, had a significant effect on the development of the cucumber plants, particularly stem height and root volume. The nutritional analysis of the leaves and stems showed variation in the treatments of both experiments. Therefore, it was concluded that agave bagasse biochar was the best amendment to improve the soil characteristics for the development of cucumber plant.

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo e implementación de tecnologías agrícolas que incrementen la productividad, pero que sean realmente sustentables es fundamental para mantener la seguridad y productividad de los alimentos (FAO, 2012). La preocupación por el cambio climático y la productividad de los alimentos ha generado un sin número de propuestas y tecnologías para no dañar los recursos ecológicos al igual que en las condiciones atmosféricas en las que la producción de alimentos depende, con el fin de estructurar medidas de adaptación locales e internacionales, así como para contrarrestar las repercusiones climáticas y también aumento de todo ello con el fin de anticipar acciones preventivas. (Skutsch *et al.*, 2011; Manyà, 2012). La degradación del suelo a nivel mundial (24%) sucede tanto en los países industrializados como en los que se encuentran en desarrollo y ocurre a tasas sin precedentes además de que provoca la emisión de gases de efecto invernadero (Lehmann y Joseph, 2009; ONU, 2011), sin embargo, junto con la reducción de la fertilidad de los suelos se acentúa en todas las regiones de clima cálido y húmedo. Esto se debe a la rápida mineralización de la materia orgánica en regiones de altas temperaturas y precipitaciones y a la presencia de minerales resultantes de procesos de intemperismo avanzado, que presentan poca capacidad de retención de nutrientes contra la lixiviación (Major, 2006). En muchas regiones, ocurre la pérdida de la productividad que en gran medida se debe al uso de agroquímicos, que al mismo tiempo son desfavorables ya que impactan en el ambiente (Lehmann y Joseph, 2009). La agricultura sustentable, es una manera de producir alimentos que son sanos para los consumidores sin causar daños a la salud del ecosistema. Generalmente, la adición de materia orgánica como la composta y estiércol en el suelo puede ayudar a mejorar la retención de nutrientes; sin embargo, bajo condiciones tropicales el incremento es corto, porque la adición de materia orgánica es rápidamente oxidada y las bases añadidas son rápidamente lixiviadas (Tiessen *et al.*, 1994; Novak *et al.*, 2009), además, el contenido bajo de nutrientes y una baja mineralización del suelo orgánico son las dos principales restricciones en la agricultura sustentable (Zheng *et al.*, 2010). Por otro lado, a pesar de que el suelo tiene una alta capacidad de retener carbono y de actuar como sumidero de gases de efecto invernadero, pues más del 80% de los sumideros de carbono terrestres se encuentran en los suelos, pueden tener una permanencia corta (Lal y Augustin, 2012), además de que 46% del carbono se encuentra almacenado en tierras secas, por lo

que puede ser liberado fácilmente a la atmósfera a causa de la degradación del suelo (ONU, 2011). Una reciente propuesta con el objetivo de mitigar gases de efecto invernadero y como una estrategia para mejorar la salud y productividad del suelo, la seguridad alimentaria y el secuestro de carbono es a través de la aplicación al suelo de mejoradores, como es el caso del “biochar” (Lehmann, 2006; Lehmann y Joseph, 2009; Blackwell *et al.*, 2009; Sparkes y Stoutjesdijk, 2011; Manyà, 2012), que es un biocarbón vegetal creado por pirólisis, un proceso de descomposición térmica (a temperaturas >300 °C) de la materia orgánica (residuos agrícolas, astillas de madera, estiércol, residuos municipales y animales), bajo un suministro limitado de oxígeno, que convierte la materia orgánica en una forma de carbono que puede permanecer estable en el suelo por cientos o hasta miles de años (ONU, 2011; Lehmann y Joseph, 2009). El biochar es considerado mucho más efectivo que otro tipo de materia orgánica ya que retiene los nutrientes, haciéndolos más disponibles para las plantas, aún más que la estabilidad y disponibilidad de nutrientes que la composta y el estiércol, por lo que podría ser más eficiente en mejorar la calidad del suelo que cualquier otra enmienda orgánica (Lehmann y Joseph, 2009; Zheng, 2010). La adición de biochar a los suelos ayuda a mejorar la fertilidad y la productividad del suelo (Lehmann y Joseph, 2009; Sparkes y Peter Stoutjesdijk, 2011), ya que puede mejorar en distintas formas al suelo: eleva el pH, la CIC, los cationes intercambiables como Ca, Mg, Na y K, la capacidad de retención de agua y la retención de nutrientes en el suelo como N y P, y disminuye el Al en el suelo (Blackwell *et al.*, 2009; Van zwieten, 2010; Zheng, 2010; MacEgliott 2011; Abenza, 2012), permitiendo el crecimiento de las plantas, y en general el desempeño en una variedad de suelos (Downie *et al.*, 2009; Blackwell *et al.*, 2009). La estabilidad del biochar, se debe a que una fracción de su carbono es muy resistente a la descomposición microbiana y a la mineralización, esta característica es la que la distingue de otras mejoras, haciéndola una herramienta de secuestro de carbono (Lehmann y Joseph, 2009; Gaunt y Cowie, 2009; McElligott, 2011). Estudios a nivel mundial, muestran que la adición de biochar como enmienda, incrementa el rendimiento en los cultivos, sin embargo, la mayoría han sido conducidos en los trópicos usando biochar producido en hornos y aplicado a suelos con baja materia orgánica o que han sido degradados a través de las actividades de la agricultura (Chidumayo, 1994; Glaser *et al.*, 2002; Yamato, 2006; Asai, 2009; Zheng, 2010; Carter, 2013). En pocos casos no se han encontrado diferencias significativas o

resultados negativos cuando se usó el biochar como una enmienda del suelo (Chan *et al.*, 2007; Sohi, 2009; Zheng, 2010; Gaskin *et al.*, 2010; Major *et al.*, 2010; Van Zwieten *et al.*, 2010). El biochar tiene una afinidad a los nutrientes y un período de persistencia larga, por lo tanto, podría ser una enmienda orgánica superior para restaurar y mejorar propiedades de los suelos agrícolas, para la captura de CO₂, desacelerando el regreso del CO₂ capturado por las plantas pero sobre todo para el incremento en la productividad de los alimentos (Lehmann y Joseph, 2009; McElligott, 2011). El objetivo de este trabajo es evaluar los efectos del biochar provenientes de tres tipos de residuos agroindustriales sobre el mejoramiento de un suelo franco arenoso y sus repercusiones en el desarrollo de la especie *Cucumis sativus* L.

2. ANTECEDENTES

2.1. La degradación de los suelos en México

La degradación del suelo se define como un cambio en la salud del suelo resultando en una disminución de la capacidad del ecosistema para producir los bienes y servicios normales del suelo en cuestión en su ecosistema (<http://www.fao.org/soils-portal/degradacion-del-suelo/es/>). Una de las principales razones por las que se degrada el suelo es la agricultura intensiva, y una vez que ha ocurrido es necesario restablecer la fertilidad del suelo usando, o bien fertilizantes sintéticos o enmiendas orgánicas. Para restaurar tierras degradadas es necesario mejorar las técnicas de cultivo estabilizando el suelo al mismo tiempo que se enriquece con materia orgánica, y se seleccionan diferentes variedades de cultivo. Entre 1981 y 2003, a nivel mundial la degradación del suelo llegó al 24%, las tierras de 110 países están en riesgo de degradación, entre un 20 y 25% del suelo en degradación son pastizales y 20% son tierras de cultivo, de estas tierras en degradación dependen 1,500 millones personas en el mundo, por lo que 42,000 millones de dólares de ingresos se pierden cada año como resultado de la desertificación y la degradación del suelo (ONU, 2011). Las tierras secas, que representan casi el 34% de la superficie terrestre y son el principal garante de seguridad alimentaria, especialmente para los más pobres, están degradándose día tras día, sin embargo, la degradación del suelo es un problema que afecta a todas las regiones, no sólo a las tierras secas o a los países en vías de desarrollo. Alrededor de un tercio del total de la tierra agrícola está moderada o severamente degradada. Las zonas de producción de alimentos están cambiando, las cosechas se abaten, el ganado muere y los estanques, lagos, ríos y aguas subterráneas se secan ONU, 2014. La desertificación, degradación de los suelos y la sequía bajo el cambio climático se combina con desafíos ya existentes, la situación se complica, generando un impacto directo negativo en las sociedades, sus economías y la seguridad pública a todos los niveles, ya que contribuyen a la crisis humana y alimentaria en la mayoría de las regiones secas del mundo, lo que convierte a la población que depende de la agricultura, el pastoreo y otros recursos naturales en emigrantes forzados. La gravedad de estos fenómenos y sus interacciones complejas desafían la viabilidad y sustentabilidad del desarrollo de todos los países afectados. La desertificación, degradación de los suelos y la sequía son claramente una

amenaza que requiere acciones coordinadas de la comunidad internacional. En las últimas décadas, diversos reportes de cuerpos internacionales han mostrado que la desertificación progresa y degrada la calidad del suelo, que el hambre afecta un número creciente de personas y que en este contexto decreciente de la seguridad alimentaria, conflictos y guerras se incrementan (Gunter-Brauch y Oswald-Spring, 2009; ONU, 2014).

En México existen 25 de las 30 unidades de suelo reconocidas por la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura), UNESCO (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura) y la ISRIC (International Soil Reference and Information Centre). Los leptosoles, regosoles y calcisoles son los suelos de más amplia distribución nacional, cubriendo cerca del 60.7% de la superficie del país, son por lo general suelos someros y con poco desarrollo, lo que dificulta su aprovechamiento agrícola. Los suelos fértiles y más explotados (feozems y vertisoles) ocupan el 18% de la superficie del país. Según un estudio del Inventario Nacional Forestal y de Suelos, el 45% de la superficie del país presenta degradación inducida por el hombre, el nivel de degradación predominante es de ligero a moderado (42.8%) y el 2.2% restante se divide entre los niveles fuerte y extremo, mientras que los procesos más importantes de degradación son la química (principalmente por la pérdida de fertilidad), la erosión hídrica y la eólica. Estos tres procesos son responsables del 87% de los suelos degradados en el país. Las principales causas de degradación en México son el cambio de uso del suelo para fines agrícolas y el sobrepastoreo (17.5% en ambos casos), la deforestación (7.4%) y la urbanización(1.5%)(http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_resumen/pdf/3_info_resumen.pdf; SEMARNAT, 2009). Además, 70% de los suelos de México presentan menos de 1% de materia orgánica (Torres *et al.*, 2003). Los suelos más abundantes de Jalisco son los regosoles y los feozems, con el 27 y 21% de cobertura territorial respectivamente, los primeros, son suelos inmaduros de textura gruesa, derivados de cenizas volcánicas y pH ligeramente ácidos que son usados para la agricultura, mientras que los segundos son suelos agrícolas, cafés de texturas medias, ricos en materia orgánica, sin embargo son suelos poco desarrollados y muy erodables. En 1953, se realizó el llamado congreso para detener el Avance de la Erosión de la Tierra en México, en el que, Jalisco, resultó uno de los estados que presenta una degradación de suelos importante, con 2, 000, 000 ha afectadas por este proceso (Hornedo, 1957 en: Ballesteros, 1989).

2.2. Historia del biochar

La idea del biochar como una enmienda del suelo no es nueva y se pueden encontrar publicaciones científicas desde el siglo XIX y XX acerca del carbón vegetal en suelos, en países como China e Inglaterra e incluso más antiguas como se menciona en un libro de Japón de 1967 (Lehmann y Joseph, 2009; Abenza, 2012). Sin embargo fue hasta que estudios recientes realizados en suelos oscuros llamados Terra Preta Do Indo (tierra negra en portugués), se renovó el interés del carbono pirogénico en suelos. La primera descripción acerca de este suelo fue realizada por Hartt en 1871, que la denominó terra cotta. Estos suelos se hallaron por primera vez en la Cuenca del Amazonas en Brasil, luego se encontraron en otros lugares de Ecuador y Perú. Estas tierras negras ocupan del 0.1—0.3% o 6, 000 a 18, 000 Km de bosque de tierras bajas del Amazonas, pero otros estiman 1% o más (Sombroek *et al.*, 2003; Denevan, 2004), está dividida en parcelas que promedian las 20 ha, aunque también existen registros de sitios que tienen hasta 500 ha (Sombroek *et al.*, 2002), ocurren en una variedad de climas, geología y situaciones topográficas, con profundidades de 2 m (Denevan, 2004). Muchos de los suelos originales de estos lugares se consideran estériles, por lo tanto Terra Preta, con su fertilidad enriquecida por el alto contenido de materia orgánica y nutrientes, como nitrógeno, fósforo, potasio y calcio, es peculiar (FAO, 2003; Maia *et al.*, 2011). Con esta evidencia, los investigadores creen que los suelos tienen un origen antropogénico, la teoría actual dice que los suelos de Terra Preta se encuentran sobre antiguos asentamientos indígenas. Esta persistencia de fertilidad fue comprobada con estudios de carbono 14 que revelaron una antigüedad que oscila entre los 1,780 y 2,260 años. Las evidencias sugieren que los nativos modificaron la fertilidad del suelo con la quema de troncos, ramas, malezas, rastrojos, capa vegetal de los bosques cercanos y también con el carbón de las cocinas y las cenizas de las casas. (FAO, 2003; Sparkes y Stoutjesdijk, 2011). El hallazgo de cerámicas ornamentales, vestigios de cultivos, de caminos, pozos y canales asociados con los suelos negros corroboran esta teoría, que también se confirma con la documentación de los europeos a su llegada al Brasil, cuando pudieron observar que estas prácticas aún se realizaban. Recientemente se encontró que contienen residuos de humanos y desperdicios animales, restos de comida y otros materiales de desperdicio nutritivos que no estaban carbonizados, (FAO, 2003, Lehmann *et al.*, 2003; Crespi *et al.*, 2007, Sparkes y Stoutjesdijk, 2011). La importancia de terra preta

en la Amazonia alcanzó conocimiento internacional en 2001-2002 cuando grupos de trabajo incluyendo geógrafos, arqueólogos y científicos del suelo de diferentes países, de Estados Unidos de América, Brasil, los Países Bajos y Colombia se juntaron en tres conferencias internacionales, en Benicassim, España; Río de Janeiro y Manaus en Brasil. Esto llevó a la producción de libros, artículos, informes de prensa y entrevistas (Denevan, 2004). A partir de estas conferencias se produjo una explosión de conocimiento que continúa en la actualidad y de esta técnica indígena provino la idea del biochar.

Por tanto el desarrollo e investigación del biochar para el manejo del medio ambiente a nivel mundial, es reciente. El interés global en biochar comenzó apenas en el 2007 y de acuerdo a Steiner (2007) en la Conferencia de Cambio climático de la ONU, se observó un incremento importante de países que están desarrollando investigación en biochar en los últimos siete años. En México, recién se comienza a estudiar el uso del biochar por lo que existen pocos trabajos, principalmente tesis de maestría y doctorado, pero hasta ahora no se han encontrado publicaciones (Escalante-Rebolledo, 2013). De igual manera experimentos en campo están en inicio en todo el mundo y el empleo de diferentes enmiendas de biochar en suelo han sido materia de investigación constante en laboratorio y existe consenso científico sobre la mejora de la fertilidad del suelo (Lehmann y Joseph, 2009; Novak *et al.*, 2009). Sin embargo, en los experimentos en campo y sus efectos todavía no se conoce bien cuáles son los beneficios en especies de cultivo con diferentes enmiendas del biochar, es por ello que se requiere mayor investigación científica, para tener datos confiables. Se han hecho pruebas que muestran que el biochar no solo es más estable que cualquier otra enmienda para suelo y que incrementa la disponibilidad de nutrientes más allá que un efecto de fertilizante, por lo que las propiedades básicas de estabilidad y capacidad de retener nutrientes son fundamentalmente más efectivas que otras materias orgánicas en el suelo. Esto significa que el biochar no es simplemente otro tipo de composta o abono que mejora las propiedades de los suelos, estudios han demostrado que es más eficiente en mejorar la calidad del suelo que cualquier otra enmienda orgánica de suelo (Lehmann y Joseph, 2009). La adición de biochar para mejorar la fertilidad del suelo y la productividad de la agricultura, es un factor que ha impactado en el interés científico ya que parece una área prometedora. La investigación ha ilustrado el potencial del biochar para mejorar la salud del suelo, la fertilidad, la estructura del suelo y la disponibilidad de nutrientes

(Sparkes y Peter Stoutjesdijk, 2011).

2.3. Procesos de conversión termoquímica

Los procesos de conversión termoquímica abarcan rangos de temperatura y tiempo de reacción desde torrefacción (200-300°C, con un tiempo de reacción largo) hasta pirólisis (>300°C con diferentes tiempos de reacción), y gasificación (>800°C con un tiempo de reacción corta). La pirólisis es el proceso de conversión termoquímico por el cual se pueden producir productos más estables de la transformación de la biomasa. Pirólisis es la descomposición térmica química (a temperaturas >300°C) de materiales orgánicos (como residuos agrícolas, astillas de madera, estiércol, residuos municipales y animales) en un sistema cerrado en ausencia o casi ausencia de oxígeno que genera syngas por sus siglas en inglés (principalmente hidrógeno, metano y monóxido de carbono), bio-aceite (alcoholes, aceites, alquitrans y ácidos) y biochar (principalmente C y contiene O, H, N y cenizas). La pirólisis generalmente se clasifica en lenta, rápida y pirólisis flash, y es un proceso exotérmico una vez que alcanza temperaturas de 300°C. En la pirólisis lenta, el tiempo de reacción es de minutos a días y generalmente la reacción tiene rendimientos de 35% de biochar, 30% de bio-aceite y 35% de syngas en peso y se manejan temperaturas mayores a los 400°C. La pirólisis rápida generalmente se realiza en un sistema de flujo continuo en donde la biomasa es rápidamente calentada por altas tasas de calentamiento y tiempos de residencia de vapor cortos, se manejan temperaturas arriba de 400°C, en donde es usual el manejo de 500°C, y resultando en un alto rendimiento de bio-aceite (50-70%) de biochar (10-30%) y de syngas (15-20%) (Warren, 2012; Brownsort, 2009).

En la pirólisis flash, la presión que tiene un rango de presión atmosférica hasta una presión alta, es usada y es calentada rápidamente (en segundos o menos), y puede ser optimizada para la producción de biochar (hasta un rendimiento del 60%) o en la producción de bio-aceite (de más del 70%). Es importante reconocer que los productos de la pirólisis, independientemente del diseño del reactor, son influenciados por la materia prima y los parámetros de operación, como temperatura y tasa de calor (Warren, 2012).

2.4. Efecto de enmiendas de biochar sobre cultivos agrícolas

Algunos autores han reportado aumentos en el rendimiento cuando el biochar es aplicado a los suelos de los cultivos, y en especial cuando éstos se añaden en conjunto con fertilizantes orgánicos o inorgánicos (Glaser *et al.*, 2002; Lehmann *et al.*, 2002; Yamato *et al.*, 2006; Steiner *et al.*, 2007; Chan *et al.*, 2007; Asai *et al.*, 2009; Van Zwieten *et al.*, 2010; Carter, 2013). De hecho, se han reportado incrementos de 200% en comparación con los tratamientos que no tienen fertilizantes y sin enmiendas de biochar (Yamato *et al.*, 2006), mientras que respuestas neutrales o negativas de crecimiento de plantas han sido observadas solo con enmienda de biochar (Asai *et al.*, 2009; Blackwell *et al.*, 2009, McElligott, 2011). Sin embargo, existen dudas alrededor de los efectos potenciales a corto y mediano plazo al aplicar el biochar en muchas regiones y ecosistemas, ya que la mayoría de las evidencias provienen de sistemas de agricultura. Mientras que los resultados han sido por mucho más neutrales o positivos (McElligott, 2011), existen algunos casos negativos. Chidumayo, (1994), trabajó en Zambia con un tipo de biochar que fue obtenido de suelos que estuvieron bajo hornos de carbón vegetal, lo evaluó con la germinación de siete especies de árboles y lo comparó con un suelo adyacente no perturbado, encontró que el pH y la tasa de germinación de las semillas fue mayor en el biochar que en el suelo no perturbado, por lo que el pH incrementó la germinación en las especies estudiadas. Van Zwieten (2010) evaluó dos tipos de biochar de residuos de fábrica de papel que mezcló con dos suelos diferentes (calcarosol limoso y ferrosol), y trabajó con tres especies de cultivo. El ferrosol enmendado con fertilizante, generó un gran incremento en la producción de la biomasa de trigo, soya y rábano en comparación al control, por lo que sugirió que al utilizar este biochar, había una mejora en la eficiencia del fertilizante. El calcarosol emendado y con fertilizante sin embargo, incrementó la biomasa del frijol de soya, pero redujo la biomasa del rábano y del trigo y no encontraron diferencias significativas de biochar en la ausencia del fertilizante para trigo y frijol, mientras que para la biomasa del rábano incrementó significativamente. Por otro lado, McElligott, (2011) trabajó con un biochar de residuos de fábricas de madera dura, el cual mezcló con dos tipos de suelo, un Andisol de textura fino y un Andisol de textura gruesa y utilizó árboles de poplar, después de ocho semanas de crecimiento, no encontró un efecto significativo en la biomasa con ambas enmiendas de suelo, sin embargo cuando el biochar fue combinado con un fertilizante, la

biomasa se incrementó significativamente con respecto al tratamiento control sin fertilizar, sugiriendo un uso eficiente en la retención del fertilizante. Abenza, (2012) trabajó con tres materias primas distintas que las comparó con el biochar de las mismas (astillas de pino, astillas de chopo y lodos de EDAR), realizado con diferentes tipos de pirolisis y a diferentes temperaturas y que fueron mezclados con un suelo haploxerept típico. Para la evaluación de los efectos del biochar, utilizó la cebada y resultó que los distintos tipos de biochar o de fertilización no influyeron en la germinación, sin embargo provocaron efectos favorables en el suelo que facilitaron un mayor desarrollo de las plantas en comparación con la aplicación de sus respectivas materias primas, además, la transformación en biochar de la madera de chopo y pino permitió reducir los efectos depresores sobre el crecimiento de la cebada que muestran los respectivos materiales de partida, y los lodos de EDAR mostraron un claro efecto inhibitor o tóxico, que no se produjo en la mezcla de suelo y lodo pirolizado, sin embargo, el aporte de cualquier tipo de biochar no produjo un mayor desarrollo del sistema radicular de las plantas de cebada. Nigussie *et al.*, (2012), investigó el efecto de la aplicación de biochar en suelos contaminados con cromo y la absorción y crecimiento de lechuga en los mismos. El biochar fue producido del tallo del maíz. De acuerdo a los resultados, la absorción de nutrientes por la lechuga fue incrementada por la aplicación de biochar, los valores más bajos fueron registrados en el control. El incremento observado en la absorción de nutrientes por la lechuga debido a la aplicación de biochar, nuevamente indica el potencial del biochar para mejorar el uso eficiente de fertilizantes especialmente en suelos donde la pérdida de N es un problema ambiental y agronómico importante. Carter *et al.*, (2013) evaluó el efecto de biochar de cáscara de arroz en el desarrollo de lechuga y de col en un experimento con tres ciclos de cosecha. Aplicaron diferentes tasas de biochar con y sin fertilizantes disponibles localmente. El biochar de cáscara de arroz, incrementó el pH del suelo y contenía altos niveles de algunos cationes intercambiables en comparación con el suelo. Los tratamientos de biochar incrementaron la biomasa final, la biomasa de las raíces, la altura de la planta y el número de hojas en todos los ciclos de cosecha en comparación con los tratamientos que no tenían biochar, sin embargo el mayor incremento en biomasa que se obtuvo debido a la adición de biochar fue en suelos sin fertilizante, más que en suelos fertilizados. A lo largo de los ciclos de cosecha el impacto se fue reduciendo, esa disminución del rendimiento pudo ser la consecuencia del

agotamiento de los nutrientes del suelo proveídos por el biochar. Zheng *et al.*, (2010) trabajó en campo para analizar el rendimiento de maíz con dos tipos de biochar, uno de mazorcas de maíz y el otro de viruta de madera. La aplicación de biochar, comparado al campo en donde no se aplicó ningún tratamiento, incrementó significativamente el rendimiento de los cultivos, incluso en la ausencia del fertilizante. Por otro lado, en la ausencia de biochar, hubo un incremento en el rendimiento cuando los fertilizantes fueron utilizados, sin embargo, cuando se integró ambos tratamientos de biochar con el fertilizante, hubo más incrementos significativos en el rendimiento del cultivo y fue mayor mientras más fertilizante fue aplicado. Además, los rendimientos del cultivo en los campos tratados con biochar y con la tasa más baja de fertilizante, fueron mucho más altos comparado a los que se les aplicó solamente la tasa más alta de fertilizante y sin biochar. Estos resultados confirmaron, según el autor, que el biochar como una enmienda de suelo, puede utilizar los nutrientes reteniendo los iones de amonio en suelos e inhibiendo la nitrificación del fertilizante y que puede reducir el uso de fertilizante manteniendo al mismo tiempo un alto rendimiento del cultivo de maíz. Guereña *et al.*, (2012) trabajaron con un biochar de rastrojo de maíz que fue aplicado a un cultivo de maíz en campo, en donde aplicó fertilizante en diferentes tasas y porcentajes. El rendimiento en el maíz y la asimilación de N no cambió con la aplicación de las diferentes tasas de biochar.

2.5. Importancia y descripción de la especie en estudio

2.5.1. Las Hortalizas y el cultivo de pepino en México

México se encuentra entre los principales productores y exportadores de hortalizas en el mundo, se ubica en el cuarto lugar a nivel mundial y el primero en el continente (Financiera Rural, 2008). Otros exportadores de gran peso son: Países Bajos, España, China, Francia, Bélgica, y Canadá; los diez principales productores de hortalizas suman alrededor de 70% de la producción de hortalizas en el mundo. México posee una riqueza de climas y ecosistemas que permiten la adecuada producción de hortalizas durante todo el año, lo cual constituye una de las principales ventajas ante otros competidores potenciales. En el país se producen alrededor de 70 variedades de hortalizas. Una proporción importante (11.2%) de la producción de hortalizas en nuestro país se realiza en temporal, pese a que algunas

investigaciones señalan que la producción de invernadero podría ser hasta 10 veces mayor. Las principales hortalizas que se cultivan bajo esta técnica son tomate, pimiento y pepino. Una elevada proporción de hortalizas de invernadero se concentran en la región occidente del país, siendo Jalisco el estado con el mayor número de hectáreas (alrededor de 200 hectáreas). Su producción Otoño-Invierno sobrepasa por mucho a la de Primavera-Verano. En el mercado interno, las hortalizas de mayor demanda a nivel nacional son el jitomate (tomate rojo), la cebolla, el tomate verde, calabaza y el pepino (Financiera Rural, 2008). Para la economía agrícola del país, el sector de las hortalizas reviste una particular importancia por su contribución en la generación de divisas y empleo en el campo. El tomate, melón, sandía y el pepino son de las más importantes. Éste último a pesar de ser poco nutritivo con el casi 100% de agua, es rico en vitamina A y C, además contiene azufre, por lo que se utiliza bastante en la industria cosmética y es muy consumido por su buena combinación con ensaladas (Jaime *et al.*, 2012).

Históricamente México ha ocupado el primer lugar como proveedor de las importaciones americanas de pepino (más del 80% del total importado). El grueso de las exportaciones (85%) se destina al mercado de los Estados Unidos de América, lo que implica una alta dependencia de éste (Jaime *et al.*, 2012). En la actualidad, México es el tercer exportador mundial de esta hortaliza con una participación en las exportaciones mundiales del 13.9% y el principal proveedor a EE.UU., con una participación de las exportaciones de México del 99.9% y siendo EE.UU. en 2010, según TRADE MAP., el mayor importador en el mundo con una cantidad de 585,575 ton (Comisión Veracruzana de Comercialización Agropecuaria, Gobierno del Estado de Jalisco, 2010; Jaime *et al.* 2012). En 2012, en México, se produjeron 640,508 ton de pepino y se sembraron alrededor de 15,340 ha con rendimiento de 42 t ha⁻¹ como media de producción. Jalisco, en 2012 fue el estado con la mayor superficie cosechada (1, 471, 443 ha) y produjo 12,586 ton de pepino, sin embargo, el estado que más produjo pepino en ese año fue Sinaloa con 283, 329 ton, el 44% de la producción Nacional (SIAP, 2012). La producción agrícola del pepino en México se presenta en diferentes modalidades como el pepino en invernadero, en malla sombra y orgánico, convirtiéndose este último en un producto con mayor demanda en los mercados internacionales. Como resultado de la aplicación de sistemas de producción, México

presenta una tasa de crecimiento anual en cantidades exportadas del 6% en el periodo 2006-2010, presentándose la mayor producción de pepino en invernadero y en malla sombra en el Estado de Baja California, mientras que Baja California Sur destaca en pepino orgánico (Jaime *et al.*, 2012). La producción de pepino en invernadero en el noroeste de México ha sido un éxito, al obtenerse buenos rendimientos con una sola duración del ciclo, siendo esta de 108 días en invierno, lo que da oportunidad de realizar dos siembras al año prolongando así la ventana de producción (Hernández, 2006 en: López *et al.*, 2011). Bajo condiciones de invernadero, la producción de pepino es de 2 a 9 veces más que en campo abierto, dependiendo del nivel tecnológico, el manejo y las condiciones climatológicas (FUMIAF, 2005 en: López *et al.*, 2011), constituyendo asimismo una alternativa a la diversificación de cultivos en invernadero (López *et al.*, 2011).

2.5.2. Generalidades del pepino (*Cucumis sativus* L.)

Originario de las regiones tropicales del sur de Asia, siendo cultivado en la India desde hace más de 3,000 años. De la India se extendió a Grecia y de ahí a Roma y posteriormente se introdujo en China. El cultivo de pepino fue introducido por los romanos en otras partes de Europa; aparecen registros de este cultivo en Francia en el siglo IX, en Inglaterra en el siglo XIV y en Norteamérica a mediados del siglo XVI, ya que Cristóbal Colón llevó semillas a América. El primer híbrido apareció en 1872 (Jaime *et. a.l.*, 2012).

-Familia: Cucurbitaceae.

-Especie: *Cucumis sativus* L.

-Planta: herbácea anual.

Raíz: La planta de pepino, desarrolla una raíz principal que puede alcanzar una profundidad en el suelo entre 100 y 120cm, de la raíz principal parten raíces secundarias, que se caracterizan por ser muy ramificadas y se extienden horizontalmente, la mayor parte de las raíces secundarias se ubican en una capa de suelo de 20-30cm (García y Angulo 2008).

Tallo: El tallo del pepino es anguloso por los cuatro lados, de porte rastrero o trepador y vellosa, el tallo principal presenta en cada nudo una hoja y un zarcillo y en las axilas de las

hojas, crecen ramificaciones, que pueden llamarse ramillas primarias y secundarias (García, 2008).

Guías: Las guías son órganos que sirven de sujeción a la planta (García y Angulo, 2008).

Hojas: Las hojas son palmeadas con cinco lóbulos y vellosas tanto el haz como el envés cubierta de vellos finos, son alternas y presentan una cutícula muy fina (García y Angulo, 2008).

Flor: El pepino es una planta de polinización cruzada, la flor tiene el pedúnculo corto, los pétalos son de color amarillo de amplia variabilidad, en la misma planta de forma separada se presentan flores masculinas, femeninas y además ciertas variedades pueden presentar flores hermafroditas (García y Angulo, 2008).

Fruto: El fruto es una baya pepónides, su superficie puede ser lisa ó con pequeñas espinas, el color depende de la variedad y puede variar desde verde claro a verde oscuro, el fruto del pepino se divide en dos grupos los de encurtidos y los de ensalada. Los frutos de los primeros son cortos y anchos, cuando aún no ha alcanzado la madurez, los frutos tienen espinas o verrugas en la superficie y su recolección se realiza antes de alcanzar la madurez fisiológica (Bolaños, 1998).

Semillas: son de forma ovalada y plana en los extremos, con una coloración de blanco a crema, miden de 8 – 10 mm, con un grosor de 3.5mm (García y Angulo, 2008).

2.5.3. Especie a evaluar:

Cucumis sativus L. Var. SMR-58. Variedad desarrollada en la Universidad de Wisconsin, produce grandes rendimientos de pepinillos, que son de color verde oscuro de 15-20 cm de largos, ligeramente cónicos con estrías longitudinales marcadas, están listos para la cosecha de los 55-58 días cuando tienen el tamaño y grosor del pulgar, especialmente cultivados para conservar en vinagres. La planta llega a medir de 45-60 cm. Adaptada al sol, pero puede tolerar algo de sombra. La floración, es a finales de la primavera y a principios y mediados del verano (Marzo-Agosto), de color amarillo. Requiere un pH del suelo de 6.1-7.5. Necesidad de agua, diario. Temperatura de germinación de los 15-35°C.

(http://www.edenbrothers.com/store/cucumber_seeds_smr58.html,<http://davesgarden.com/guides/pf/go/70099/#b>).

2.6. Generación y aprovechamiento de residuos agroindustriales

Desde hace varias décadas los residuos agroindustriales han sido un foco de atención para varios investigadores a nivel mundial, debido a que parte de sus constituyentes pueden ser materia prima para generar diversos productos de interés ya que existe una tendencia mundial notable en el crecimiento de la generación de residuos, derivado del incremento de productos comercializables, y se prevé que continuará en el futuro. La agroindustria es una actividad económica que combina el proceso productivo agrícola con el industrial para generar alimentos o materias primas semi-elaboradas destinadas al mercado; a partir de esto, se puede decir entonces que los residuos agroindustriales son materiales en estado sólido o líquido que se generan a partir del consumo directo de productos primarios o de su industrialización, y que ya no son de utilidad para el proceso que los generó, pero que son susceptibles de aprovechamiento o transformación para generar otro producto con valor económico, de interés comercial y/o social. El problema, es que no existe una clara conciencia ambiental para su manejo, además de que falta capacidad tecnológica y recursos económicos para darles un destino final, así como una legislación específica para promover la gestión de este tipo de residuos, que asegure un buen manejo desde su generación hasta su disposición final. Aún en nuestros días, esta problemática prevalece a nivel mundial (Saval, 2012).

Un “subproducto” es un producto secundario, bien conocido, generalmente útil, comercializable y por lo tanto con valor agregado, que resulta de un proceso industrial. El término “residuos”, se aplica a aquellos que pueden tener o no un valor comercial, porque son poco comunes o porque se generan en bajas cantidades, sin embargo, algunos de sus constituyentes aún en baja proporción, le pueden conferir algún interés para su utilización. Desde este punto de vista, los términos “subproducto” y “residuo” podrían utilizarse como sinónimos. En general, las características de los residuos agroindustriales son muy variadas, dependen de la materia prima y del proceso que los generó, no obstante, comparten una característica principal que es el contenido de materia orgánica, constituida por diferentes

porcentajes de celulosa, lignina, hemicelulosa y pectina. Por ser la materia orgánica su principal componente, en la práctica se les denomina “residuos orgánicos”, dentro de este rubro se incluyen otros residuos, como los lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales, la hojarasca de parques y jardines, así como los residuos domésticos y residuos sólidos municipales (Saval, 2012). En el 2006, se publicaron datos oficiales que establecen que en México se produjeron 75.73 millones de ton de materia seca proveniente de 20 cultivos, de los cuales 60.13 millones de ton corresponden a residuos primarios, obtenidos al momento de la cosecha, entre los que están: hojas y tallos del maíz, tallos y vaina de sorgo, puntas y hojas de caña de azúcar, paja de trigo, paja de cebada y de frijol, así como cáscara de algodón. El resto, 15.60 millones de toneladas corresponden a residuos secundarios obtenidos del procesamiento post-cosecha, entre los que están: bagazo de caña de azúcar, mazorcas y olotes, bagazo de maguey o agave, así como pulpa de café (Valdez-Vázquez *et al.* 2010 en: Saval, 2012),

Mundialmente es muy reconocida la importancia que tiene la industria del tequila en México, principalmente en el estado de Jalisco. Desde hace tiempo su desarrollo industrial ha ido en constante crecimiento con dos importantes problemas por resolver, las aguas residuales llamadas vinazas, producto de la destilación del tequila, y el volumen de bagazo de agave, producto de la extracción de los azúcares fermentables de las cabezas de la planta *Agave tequilana* Weber var. azul. La producción de bagazo de agave es equivalente al 40 % del peso de las cabezas de agave molidas. Si se considera que en el año 2008 se molieron 834 mil ton de agave se concluye que tan sólo ese año se generaron 333, 600 ton de bagazo. Tradicionalmente el bagazo de agave había sido utilizado para la fabricación de ladrillos y colchones, pero para los grandes volúmenes que se generan, este aprovechamiento no representaba un impacto importante en la utilización de este material, por lo que la industria del tequila se vio obligada en los últimos años a buscar alternativas de manejo en grandes volúmenes. Así, se decidió por el compostaje para resolver este problema, aunque buscando siempre que durante el proceso se pudieran tratar simultáneamente sus aguas residuales o vinazas (Íñiguez, 2011). Por otro lado, México, debido a su tradición tiene una amplia producción agrícola en el cultivo de maíz, con lo que genera más de 35 millones de toneladas anuales. Del procesamiento post-cosecha, debido al desgranado mecánico del maíz (*Zea mays* L.) se generan residuos de olote, un tejido esponjoso y blanco que

representa la médula donde se almacenan las reservas alimenticias del cereal y que genera residuos por encima de las 25 millones de toneladas. Actualmente el olote se emplea como forraje y soporte para disminuir la erosión en la tierra, ambos procesos con bajos rendimientos y poco redituables, de otra manera, los residuos del maíz son incinerados o esparcidos en la intemperie, generando contaminación ambiental (Robledo-Olivo *et al.*, 2012). El biochar podría ser una alternativa importante de aprovechamiento para esa cantidad enorme de residuos o subproductos.

2.7. Materia prima y sus efectos en el producto del biochar

La biomasa está generalmente compuesta principalmente de tres materiales poliméricos naturales: celulosa, hemicelulosa y lignina. Otro grupo de compuestos son los extraíbles que normalmente son moléculas orgánicas pequeñas o polímeros. También dentro de la biomasa se encuentran los minerales, que son compuestos inorgánicos. Todos estos grupos se encuentran en diferentes proporciones y varían en diferentes tipos de biomasa, incluso entre especies, estas proporciones tienen influencia en el producto durante la pirólisis (Mohan *et al.*, 2006; Brown, 2009; Brownsort, 2009). Calentando a temperaturas de pirólisis, los componentes se distribuyen de la siguiente manera: La descomposición de los productos primarios de la celulosa y la hemicelulosa son los vapores condensables (por lo tanto resultan productos líquidos) y gas. La lignina se descompone en líquidos, gas y en productos sólidos de carbón. Los extraíbles contribuyen en los productos líquidos ya sea por simple volatilización o descomposición. Los minerales se quedan en el carbón, en donde son nombrados cenizas (Brownsort, 2009).

La composición química de la materia prima, tiene un impacto directo en las características físicas del biochar producido. A temperaturas arriba de 120°C, los materiales orgánicos comienzan a tener alguna descomposición térmica, perdiendo enlaces químicos con la humedad. Las hemicelulosas se degradan de los 200 a los 260°C, la celulosa de los 240°C a 350°C y la lignina de los 280° a los 500°C. Por lo tanto, las proporciones de estos componentes van a influenciar el grado de reactividad y por lo tanto, el grado en que la estructura física es modificada durante el proceso (Downie *et al.*, 2009). Los macroporos más grandes en la estructura del biochar son característicos de la estructura vascular de la

materia prima (Downie *et al.*, 2009; Warren, 2012). Además la composición de la materia prima a lo largo con las condiciones del proceso influyen en la superficie funcional del biochar que puede tener grandes cantidades de propiedades ácidas, básicas, hidrofílicas e hidrofóbicas (Amonette y Joseph 2009; Warren; 2012). El incremento en el contenido de la ceniza de la materia prima resulta en el incremento en el contenido de la ceniza del biochar resultante, que lo acompaña una disminución en el contenido de carbono (Gaskin *et al.*, 2008; Warren, 2012). Un alto contenido de lignina en la materia prima ha mostrado que incrementa el rendimiento del biochar, y de igual manera, un alto contenido de holocelulosa: lignina disminuye el rendimiento del biochar e incrementa el rendimiento de los volátiles (bio-aceite y syn-gas) (Warren, 2012).

3. HIPÓTESIS

La aplicación de biochar como enmienda en el suelo tendrá un efecto significativo en la mejora de las características del suelo agrícola y en el desarrollo de la especie *Cucumis sativus* L.

4. OBJETIVO

Determinar las características físicas y químicas de biochar a partir de residuos lignocelulosicos, así como evaluar sus efectos como enmienda en el desarrollo de *Cucumis sativus*.

5. OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

1. Determinar las características de humedad, lignina, celulosa, hemicelulosa y extraíbles de bagazo de agave, olote y viruta de álamo.
2. Determinar las características físicas y químicas de biochar a partir de bagazo de agave, olote y viruta de álamo.
3. Evaluar el efecto del biochar como aditivo del sustrato (Peat-moss) en el desarrollo de plántulas de la especie *Cucumis sativus*.
4. Evaluar el efecto de las enmiendas de biochar en el desarrollo de la especie *Cucumis sativus*.
5. Analizar el contenido nutrimental en hojas de *Cucumis sativus*.

6. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1. Sitio de Estudio

El estudio se llevó a cabo en las instalaciones del Departamento de Botánica y Zoología y del Departamento de Ecología del Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias (CUCBA) de la Universidad de Guadalajara (U de G).

6.2. Residuos agroindustriales

Para obtener el biochar se consideraron tres residuos agroindustriales de diferente origen: Bagazo de agave (*Agave tequilana* Weber) tequilero, que se obtuvo de una empresa tequilera (A), viruta de álamo (*Liriodendron tulipifera*), proveniente de una fábrica de muebles (V) y olote de maíz (*Zea mays*), que se obtuvo como residuo de un experimento realizado en el CUCBA y fue molido con una malla con abertura de 0.77 mm.

6.3. Caracterización de los residuos agroindustriales

Para el análisis de lignina, hemicelulosa, extraíbles y alfa, beta y gama celulosa de los residuos agroindustriales, se emplearon las normas TAPPI (1998): para el muestro y preparación de la muestra para análisis (T 257 cm-85), preparación para análisis químico (T 264 cm-97), para el análisis de alfa, beta y gama celulosa (T 203 cm-99), para lignina (T 222 om-98) para holocelulosa (TAPPI T 257), y para extraíbles (T 264 cm-97). Este análisis fue llevado a cabo en el Lab. Centro de Fibras de pulpeo y blanqueo del Departamento de Madera, Celulosa y Papel del Centro Universitario de ciencias Exactas e Ingenierías (CUCEI) de la Universidad de Guadalajara.

6.4. Método de producción de biochar

Para obtener el biochar, los tres materiales se sometieron de manera independiente a pirólisis lenta a 450°C en un reactor de 3 cámaras a base de gas LP.

6.5. Determinación de las características físicas y químicas en los diferentes tipos de biochar.

6.5.1. Análisis físicos de Biochar

Densidad aparente. Analizada de acuerdo a De Boodt *et al* (1974).

Densidad real. El método que se utilizó para analizar densidad real fue el del Picnómetro, con una modificación pues se usó un matraz volumétrico aforado y una bomba de vacío, el principio en el que se basa es el de Arquímedes y para densidad aparente.

6.5.2. Análisis químicos de Biochar

El análisis de pH se realizó en base a Ansorena (1994). Se analizaron 10 muestras de cada tipo de biochar, y la muestra se vertió en un vaso de precipitado con agua deionizada en una relación de 1:6, es decir 10 g de biochar en 60 mL de agua destilada, esta solución se mezcló durante una hora en un agitador. Posteriormente se analizaron las muestras de la extracción con un potenciómetro.

Los siguientes análisis se realizaron en el Laboratorio Ambiental y de Abonos orgánicos del CUCBA:

Capacidad de intercambio catiónico (CIC). La CIC se llevó a cabo con el método de acetato de amonio. Para CIC se utilizó un sistema de destilación Tecator, Kjeltex System 1026. El filtrado del acetato de amonio se utilizó para analizar los cationes intercambiables de Ca, Mg, K y Na de acuerdo a Huerta, 1982. El análisis de la CIC y de los cationes intercambiables se llevó a cabo mediante absorción atómica (Ca, K, Mg y Na).

Determinación de nutrientes. La extracción de nutrientes se llevó a cabo por el método mehlich- 3. La determinación del P se llevó a cabo por el método colorimétrico y se analizó con un espectrofotómetro y la determinación de K, Ca, Mg, Na, Mn, Cu y Zn por absorción atómica (marca VARIEN AA24OFS, Fat sequential atomic absorption spectrometer). Se realizaron 3 repeticiones por muestra. Se realizaron 3 repeticiones por muestra.

Relación carbono-nitrógeno. El carbono se obtuvo de dividir la materia orgánica de los materiales de biochar entre el coeficiente 1.724, el nitrógeno se obtuvo del análisis total de

nitrógeno kjeldahl. Con la división de los resultados de carbono y nitrógeno se obtuvo la relación C/N.

Análisis proximal. La humedad, cenizas, materia volátil y materia orgánica de biochar fueron llevados a cabo de acuerdo al método Estándar D-1762-84 de la ASTM, 2007, para análisis químico de carbón vegetal de la madera y fueron realizados en el Lab. Centro de Fibras de pulpeo y blanqueo del Departamento de Madera, Celulosa y Papel del Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías (CUCEI).

Posteriormente para la evaluación de humedad, ceniza y materia volátil de 3 muestras se determinó de la siguiente manera:

Toda la muestra se molió, se evitó el molido de partículas más pequeñas por medio del empleo del cernidor del No.100 ya que contribuye a errores durante la rápida evolución de gases en la determinación de materia volátil. Las partículas que se retuvieron en el cernidor No.20 no se usaron.

Procedimiento:

Se hicieron determinaciones en triplicado:

1. Humedad. Se calentó la mufla a 750°C y se colocaron previamente los crisoles de porcelana de ignición y se cubrieron en el horno por 10 min. Se enfriaron en un desecador por una hora, se pesaron y se añadieron aproximadamente 1g de la muestra. Posteriormente se colocaron en el horno a 105°C por 2 h. Las muestras se secaron en un desecador por una hora y se pesaron.

2. Materia volátil. Se calentó la mufla a 950°C, se precalentaron los crisoles usados para la determinación de la muestra con las tapas en su lugar una vez conteniendo la muestra, se prosiguió de la siguiente manera:

Con la puerta abierta del horno durante 2 min se deja la muestra en la orilla externa del horno (300°C), posteriormente se deja por 3 min (500°C). Después se movieron las muestras a la parte posterior del horno durante 6 min con la puerta cerrada. Se enfriaron las muestras por 1h y se pesaron.

3. Cenizas. Se colocaron los crisoles con muestras sin cubrir empleados en la determinación de materia volátil en el horno a 750°C por 6h. Se enfriaron en un desecador por 1h y se pesaron.

Cálculos y reporte:

Se calculó el porcentaje de la humedad en la muestra de la siguiente manera:

$\% \text{Humedad} = [(A-B)/A] \times 100$ donde:

A=gramos de la muestra secada al aire

B=gramos de la muestra después de secarse a 105°C

Se calculó el porcentaje de la materia volátil de la muestra de la siguiente manera:

$\% \text{Materia volátil} = [(B-C)/B] \times 100$ en donde:

C= gramos de la muestra después de secar a 950°C

Se calculó el porcentaje de la ceniza en la muestra de la siguiente manera:

$\% \text{Ceniza} = (D/B) \times 100$ en donde:

D=gramos de residuo

6.6. Evaluación biológica

En esta etapa del trabajo, para evaluar el efecto del biochar en el desarrollo de la planta de pepino, se llevaron a cabo dos experimentos. Previo a la siembra en charolas, se evaluó la germinación de la semilla de pepino de la variedad SMR-58, para ello se sembraron 30 semillas en cada caja de Petri, con un total de cuatro, con papel filtro whatman del No.1 y agua destilada.

6.6.1. Experimento 1. Etapa de evaluación en charola.

Los tratamientos a evaluar fueron los siguientes: biochar (olote, bagazo de agave y viruta de álamo) en proporciones de 5%, 10% y 20% y se mezcló con peatmoss, además del control en el cual sólo se utilizó peatmoss. En total, sumaron 10 tratamientos con 120 repeticiones cada uno.

Siembra. Las semillas de la especie *Cucumis sativus* se sembraron el 15 de enero de 2014 en charolas de unisel con 60 cavidades (con un volumen de 160 mL/cavidad). A partir de los 29 días posteriores a la siembra, se comenzó a aplicar fertilizante 20-20-20 de Peters Professional water soluble fertilizer de Scotts Sierra Horticultural Products Company (0.6 g x L) en el riego y se siguió regando diariamente aprox. 0.5 L de agua con fertilizante por charola y cuando la temperatura se elevó, se regó aprox. 0.8 L de agua con fertilizante.

Variables a evaluar

Crecimiento. Se midió la altura y el diámetro del tallo, longitud y volumen de la raíz. Se realizaron 9 repeticiones por tratamiento.

Peso seco. Para el análisis de peso seco, en la primera fecha (27 de febrero), a los 43 días de la siembra, se realizaron tres repeticiones con tres plantas de pepino de cada una por tratamiento, en la segunda fecha (20 de Marzo de 2014) a los 64 días de la siembra, se realizaron tres repeticiones con 10 plántulas de cada una por tratamiento. Se separó cada uno de los componentes en hojas con tallos y raíces. Las muestras de cada componente se guardaron en bolsas de plástico selladas, para ser trasladadas al laboratorio en donde se secaron en una estufa a 65°C durante 72 horas, hasta obtener peso constante (Pearcy *et al.*,

2000). Posteriormente, se pesaron cada uno de los componentes de la planta de pepino para sacar sus medias finales (Schlegel *et al.*, 2000; Parada *et al.*, 2010).

Lixiviados. Se vertió agua corriente en la cavidad de las charolas y se recogieron de 80-90 ml de lixiviado en vasos de plástico, estos lixiviados fueron analizados con un potenciómetro HI 9813-6 (Hanna instruments) para medir pH y conductividad eléctrica. Este análisis se realizó a los 40 días (24 de febrero de 2014) de sembrado. Se realizaron 3 repeticiones por tratamiento.

Evaluación de clorofila en unidades SPAD. A los 41 (25 de febrero de 2014) y 63 días (19 de marzo de 2014) de sembrado, se realizaron mediciones de clorofila de 6 repeticiones con un equipo para analizar clorofila SPAD (Minolta) en la segunda hoja en crecimiento.

Análisis Foliar de Nutrientes. Las hojas se lavaron con agua corriente y posteriormente con agua destilada para eliminar residuos de agua corriente. Se secó a 65°C por 72h y posteriormente se molieron. Se calcinaron alrededor de 0.5 g de muestra, empezando con 250°C aumentando de 100 en 100 hasta 550°C y se apagó hasta enfriar. Para la digestión se agregaron 9 mL de ácido clorhídrico concentrado, 3 mL de ácido nítrico concentrado y 5 mL de agua destilada y se dejó media hora, se filtró con papel filtro No.42 en un matraz volumétrico de 100 mL. Se realizaron 2 lavados en el vaso de precipitado con agua destilada, una vez filtrado se llevó a aforo de 100 mL. (Thompson *et al.*, 2001). La determinación del P se llevó a cabo por el método colorimétrico y se analizó con un espectrofotómetro y la determinación de K, Ca, Mg, Na, Mn, Cu y Zn por absorción atómica (Marca VARIEN AA24OFS, Fat sequential atomic absorption spectrometer). Se realizaron 3 repeticiones por muestra.

6.6.2. Experimento 2. Etapa de evaluación en maceta. Previo a la evaluación biológica se realizaron los análisis físicos y químicos del suelo y de la mezcla (Suelo y biochar).

Análisis físicos y químicos de suelo y de mezcla (Suelo y biochar). Estos análisis se realizaron en el Laboratorio Ambiental y de Abonos orgánicos del CUCBA. Se tomaron totalmente al azar, 10 muestras de 35 g (3 submuestras) del suelo agrícola y de las mezclas de suelo y biochar de los distintos tratamientos, y se mezclaron para homogeneizar y se colocaron en bolsas de plástico para su posterior análisis (Hodgson, 1987; González, 2005). El suelo agrícola fue cernido en una malla con una apertura de 2 mm x 1.5 mm.

Textura. Se utilizó el método de Bouyucos, (1936). El método que se utilizó para analizar densidad real fue el del Picnómetro, con una modificación, pues se usó un matraz volumétrico aforado y una bomba de vacío, el principio en el que se basa es el de Arquímedes y para densidad aparente, se utilizó el método de la probeta.

Capacidad de intercambio catiónico (CIC). La CIC se llevó a cabo con el método de acetato de amonio. Para CIC se utilizó un sistema de destilación Tecator, Kjeltec System 1026. El filtrado del acetato de amonio se utilizó para analizar los cationes intercambiables de Ca, Mg, K y Na de acuerdo a Huerta, 1982. El análisis de la CIC y de los cationes intercambiables se llevó a cabo mediante absorción atómica (Ca, K, Mg y Na).

Materia orgánica. Se utilizó el método de Walkley-Black, (1934) de acuerdo a la NOM-021-SEMARNAT-2000).

Evaluación biológica. A los 55 días posteriores de haber realizado la siembra en charolas de unicel, (11 de Marzo de 2014), 10 plantas por tratamiento del primer experimento se transplantaron a macetas de 1 L: se aplicó biochar en proporciones de 5%, 10% y 20% en volumen y se mezclaron con un suelo agrícola franco arenoso, como testigo se utilizó el mismo suelo franco arenoso, sumaron en total 10 tratamientos. A los 5 días de trasplantadas todas las plántulas de todos los tratamientos de biochar con suelo se continuó aplicando fertilizante (100 macetas en total con sus respectivos tratamientos). Se regó con aprox. 0.4 L por maceta de agua con fertilizante, una vez al día. Al final del experimento cuando la

temperatura se elevó mucho en las últimas dos semanas, se regaba con la misma cantidad, dos a tres veces al día. Una vez desarrolladas las plantas, a los 32 días de transplantadas, se tomaron 9 plantas o repeticiones por tratamiento y fueron llevadas a laboratorio para las mediciones de crecimiento y biomasa.

VARIABLES A EVALUAR

Crecimiento. Se midió la altura y el diámetro del tallo (Seis repeticiones), longitud y volumen de la raíz (Tres repeticiones).

Peso seco. Para el análisis de peso seco, se realizaron 9 repeticiones de cada tratamiento para los tallos y hojas y 3 repeticiones de cada tratamiento para la raíz, utilizando solamente una planta por repetición, a los 32 días de haber trasplantado las plantas de pepino a maceta (8 de abril de 2014), y se aplicó el método destructivo. Se separó cada uno de los componentes en hojas con tallos y raíces. Las muestras de cada componente se guardaron en bolsas de plástico selladas, para ser trasladadas al laboratorio en donde se secaron en una estufa a 65°C durante 72 horas, hasta obtener peso constante (Percy *et al.*, 2000). Posteriormente, se pesaron cada uno de los componentes de la planta de pepino para sacar sus medias finales (Schlegel *et al.*, 2000; Parada *et al.*, 2010).

Lixiviados. Se vertió agua corriente en la cavidad de las charolas y de las macetas y se recogieron de 80-90 ml de lixiviado en vasos de plástico, estos lixiviados fueron analizados con un potenciómetro HI 9813-6 (Hanna instruments) para medir pH y conductividad eléctrica. Este análisis se llevó a cabo a los 26 días (2 de abril de 2014) del trasplante, se realizaron 3 repeticiones por tratamiento.

Evaluación de clorofila en unidades SPAD. A los 31 días (7 de abril de 2014) después de transplantadas a maceta con suelo, se realizaron mediciones de clorofila de 6 repeticiones con un equipo para analizar clorofila SPAD (Minolta) en la segunda hoja en crecimiento.

Análisis Foliar de nutrientes. Las hojas se lavaron con agua corriente y posteriormente con agua destilada para eliminar residuos de agua corriente. Se secó a 65°C por 72h y

posteriormente se molieron. Se calcinaron alrededor de 0.5 g de muestra, empezando con 250°C aumentando de 100 en 100 hasta 550°C y se apagó hasta enfriar. Para la digestión se agregaron 9 mL de ácido clorhídrico concentrado, 3 mL de ácido nítrico concentrado y 5 mL de agua destilada y se dejó media hora, se filtró con papel filtro No.42 en un matraz volumétrico de 100 mL. Se realizaron 2 lavados en el vaso de precipitado con agua destilada, una vez filtrado se llevó a aforo de 100 mL. (Thompson *et al.*, 2001). La determinación del P se llevó a cabo por el método colorimétrico y se analizó con un espectrofotómetro y la determinación de K, Ca, Mg, Na, Mn, Cu y Zn por absorción atómica (Marca VARIEN AA24OFS, Fat sequential atomic absorption spectrometer). Se realizaron 3 repeticiones por muestra.

6.7. Análisis Estadístico. En ambos experimentos, se hizo un diseño completamente al azar para la especie de pepino (*Cucumis sativus*) y se realizaron pruebas ANOVA y se compararon las medias de las variables de crecimiento, clorofila, peso seco, pH, conductividad eléctrica y del análisis foliar de nutrientes, los resultado se analizaron utilizando el paquete estadístico FAUANL.

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1. Caracterización química de residuos agroindustriales

Las plantas están formadas principalmente por celulosa, hemicelulosas, lignina y pequeñas cantidades de extraíbles y minerales, aunque la constitución química depende de la especie botánica y del órgano vegetal o residuo de la planta; los árboles generalmente tienen más lignina pero menos cenizas que los pastos (Brown, 2009; Amonette y Joseph, 2009; Maia *et al.*, 2011); las maderas duras (dicotiledóneas) tienen menos lignina que las maderas blandas (coníferas) (Raven *et al.*, 1992; Hon y Shiraishi, 2001) y los pastos tienden a tener más hemicelulosas, extraíbles y ceniza pero menos lignina y celulosa que las maderas blandas (Warren, 2012). La madera de álamo, como madera dura, resultó con un porcentaje mayor de lignina (19.5%) que los otros dos residuos, sin embargo, fue similar al de olote (19.2 %), el porcentaje de celulosa también fue muy similar entre los tres residuos pero el olote registró un mayor porcentaje (46.5%) al igual que en el porcentaje de hemicelulosa (29.2%), no obstante, el agave fue el residuo con la mayor cantidad de extraíbles (14%) y cenizas (1%) (Tabla 1). Si se comparan los resultados de las variables de los residuos de este estudio con otros autores, el agave tuvo una cantidad más baja de cenizas pero resaltó en el contenido de extraíbles (Espino *et al.*, 2014; Kestur *et al.*, 2013; Pérez-Pimienta *et al.*, 2013), aunque en la cantidad de los extraíbles en el álamo, se obtuvieron resultados muy superiores con respecto a algunos autores (Koo *et al.*, 2011; Kim *et al.*, 2011; Kim *et al.*, 2012). En el olote, al compararlo (Kaliyan y Morey, 2010; Córdoba *et al.*, 2013; Garrote *et al.*, 2007) se observó que las cenizas fueron más bajas y la lignina ligeramente alta. La diferencia entre las muestras de este estudio comparadas con las de otros autores puede ser debida a distintos aspectos entre la que destaca la composición química (lignina, celulosa, hemicelulosas, extraíbles y cenizas) la cual depende significativamente de muchos factores como la variabilidad natural que existe dentro de la misma especie, clima, cosechas, maduración, técnica o procesos de extracción y condiciones experimentales durante las pruebas (Warren 2012; Kestur *et al.*, 2013; Sorek *et al.*, 2014).

Tabla 1. Humedad, extraíbles totales, lignina de residuos agroindustriales, celulosa, hemicelulosas y cenizas de viruta de álamo (Álamo), olote (Olote) y bagazo de agave (Agave).

Residuo agroindustrial	Humedad (%)	Extraíbles totales	Lignina	Celulosa	Hemicelulosa	Cenizas
Álamo	7	9	19.5	44.5	26.4	0.6
Olote	11	4.3	19.2	46.5	29.2	0.8
Agave	7	14	15.9	44.8	25.1	1.0

7.2. Rendimiento de biochar

De la misma manera existen factores como el proceso de pirólisis, la temperatura máxima a la que se realiza, bajas velocidades de calentamiento, presiones altas, humedad, la residencia del vapor, tamaño de partícula y la composición química de la materia prima, que pueden afectar los rendimientos del biochar (Antal y Grønli, 2003; Amonette y Joseph, 2009, Manyà, 2012; Warren, 2012). Aunque los rendimientos de biochar de la pirólisis lenta pueden ir de 20% a 50% en una amplia variedad de materias primas o residuos, es común que se obtengan rendimientos del 35% (Warren, 2012; Miller-Robbie *et al.*, 2015). El rendimiento de biochar de olote (29%) de este estudio se encuentra dentro de los valores que marcan otros autores, por ejemplo, Demirbas, (2004) pirolizó el olote de maíz a varias temperaturas en un rango de 177°C donde generó un rendimiento de biochar del 31% hasta una temperatura de 977°C, en la que obtuvo un rendimiento del 6% y observó que a mayor temperatura disminuía el rendimiento del biochar, y a una temperatura intermedia (477°C), encontró un rendimiento del 26%; en otro trabajo se obtuvieron rendimientos del 33% con una temperatura de 450°C (Ogunjobi y Lajide, 2013), Ioannidou *et al.* (2009) a una temperatura de 500°C generó rendimientos del 33 y 37% y Zheng *et al.* (2010) a 450°C 30%. Se han publicado diferentes trabajos con biochar de maderas duras (Brewer *et al.*, 2009; Laird *et al.*, 2010; Spokas *et al.*, 2010; Ippolito, *et al.*, 2014), sin embargo, para la madera de álamo (particularmente *Liriodendron tulipifera*) se han realizado pocos trabajos, a pesar de que se ha estudiado ampliamente por su rápido crecimiento y su biomasa lignocelulósica (Kim *et al.*, 2012); Byrne y Nagle (1997) al pirolizar el álamo a 400°C obtuvieron un rendimiento de 31% y Kim *et al.* (2011) realizaron biochar con pirólisis

rápida en un rango de temperaturas de 550 a 400° y obtuvieron un rendimiento de 8 a 29% de biochar, a 450°C produjo 12% de biochar, por lo que a mayor temperatura disminuía el biochar, mientras que los resultados en rendimiento en este estudio con pirólisis lenta fueron de 24%.

Por otro lado, hasta ahora, no se han publicado trabajos con biochar de bagazo de agave tequilero, como una enmienda para el suelo. Según la literatura, un alto contenido de lignina en la materia prima incrementa el rendimiento del biochar (Demirbas, 2004; Ammonette y Joseph, 2009; Manyà, 2012), sin embargo, a pesar de que la madera de álamo en este estudio fue el residuo que tuvo la mayor cantidad de lignina (19.5%) resultó con menor rendimiento de biochar (24%), en cambio el agave junto con el olote tuvieron los rendimientos más altos de biochar (29%) (Tabla 2).

Tabla 2. Rendimiento promedio de biochar de los residuos agroindustriales de bagazo de agave, viruta de álamo y olote.

Sustrato	Rendimiento de biochar (%)
Agave	29
Álamo	24
Olote	29

En este caso, el mayor rendimiento del agave pudo haber sido debido a la alta cantidad de cenizas, pues un alto contenido de estas en la materia prima, resulta en un alto rendimiento del biochar (Antal y Grønli, 2003; Fahmi *et al.* 2007; Amonette y Joseph, 2009), la materia prima de agave fue la que tuvo el mayor porcentaje de cenizas (1%) y posteriormente al realizar el análisis proximal de los biochar, el biochar de bagazo de agave presentó un 12.4% de cenizas mientras que el álamo presentó 0.90% y el olote 3.59%, por lo que esta baja cantidad cenizas en el álamo pudo causar un menor rendimiento en el biochar de éste. En el caso del olote, en cada pirolización se utilizó menos material ya que se tardaba en

subir a la temperatura deseada, esto debido probablemente a la alta cantidad de metales alcali (K y Na) que pueden actuar como catalizadores reduciendo la energía de activación para la reacción de la pirólisis (Fahmi *et al.*, 2007; Warren, 2012). La humedad también puede influenciar el rendimiento (Antal y Grønli, 2003), aunque la materia prima de álamo y agave tuvieron la misma humedad, el álamo resultó con un rendimiento mucho menor que el agave. En este estudio, se esperaba que la viruta de álamo por ser madera y contener mayor lignina tendría un mayor rendimiento, pero fue todo lo contrario, pues a veces las maderas de árboles caducifolios presentan rendimientos considerablemente más bajos que las coníferas (Antal y Grønli, 2003) e igual que para Fahmi *et. al* (2008), los minerales de los residuos agroindustriales de este estudio, jugaron un papel más importante en la pirólisis que la lignina para producir un mayor rendimiento de biochar.

7.3. Caracterización química de biochar

7.3.1. Análisis proximal de biochar

El análisis proximal se ha utilizado para caracterizar y tener una mejor calidad del carbón combustible vegetal, que se originó de la industria del acero y la industria química, por lo que en los últimos años se ha utilizado para caracterizar el biochar (FAO 1983, Joseph *et al.*, 2009), aunque existen diversos autores que han utilizado esta metodología, no existen estándares químicos fijos para caracterizarlo e incluso ha sido modificada (McLaughlin *et al.*, 2009), sin embargo, se encuentra sujeta todavía a modificaciones, en la Tabla 3 se presentan los resultados del análisis proximal y la relación C/N obtenidos en el presente estudio. El biochar de álamo resultó con una materia volátil ligeramente más alta que la de olote, pero resultó con una menor cantidad de cenizas y por ende con un alto porcentaje de carbono fijado (85.60%), pues en general las maderas tienden a tener menos minerales que otras especies de plantas, por lo que tienden a aumentar el contenido de carbono (Gaskin *et al.*, 2008) lo que se vinculó también con la relación C/N que fue hasta tres veces más alta que en los otros residuos (228). Contrariamente, el biochar de bagazo de agave registró la mayor cantidad de materia volátil (14.56%) y de cenizas (12.44%) lo que correspondió a una disminución en el contenido de carbono fijado que además estuvo correlacionado con una baja relación C/N (72). Los pastos como ya se mencionó tienden a tener más cenizas que las maderas, este es el caso del olote que resultó con un valor de 3.59%, y aunque no

fue tan alto, si superó al biochar de bagazo de agave en el carbono fijado (81.95%) al igual que en la relación C/N (85).

Tabla 3. Análisis proximal (Humedad, Cenizas, materia volátil y carbono fijado) y relación carbono/ nitrógeno (C/N) de tres sustratos de biochar: viruta de álamo, olote y bagazo de agave.

Sustrato de biochar	Humedad %	Cenizas %	Materia volátil %	Carbono fijado%	C/N
Álamo	0.08±0.05	0.90±0.07	13.78±1.08	85.60±1.71	228±26.09
Olote	0.80±0.07	3.59±0.10	13.51±0.36	81.95±0.35	85±1.49
Agave	1.51±0.23	12.44±0.01	14.56±1.53	71.71±1.46	72±1.99

7.3.2. pH de biochar

Uno de los beneficios del biochar es que tiende a ser alcalino, por lo que puede ayudar a disminuir la acidez de los suelos (Gaskin *et al.*, 2008), el pH de la mayoría de los biochar de pirólisis lenta puede ir de 7.5 a 10.5, es decir de medianamente alcalinos a fuertemente alcalinos según la NOM-021-SEMARNAT-2000, sin embargo, se pueden encontrar valores desde cuatro hasta arriba de 12 con otros tipos de pirólisis (Lehmann *et al.*, 2011). A mayor temperatura, el resultado es mayor pH (Lehmann *et al.*, 2011; Muter *et al.*, 2014), como el caso de Gaskin *et al.*, (2008) que manejó temperaturas de 400°C y 500°C con madera de pino, con un pH de 7.55 y 8.30 respectivamente, sin factores como los minerales de la materia prima y ésta misma influyen en el pH de los biochar (Tryon 1948; Gaskin *et al.*, 2008; Carrier *et al.*, 2013). Según la NOM-021-SEMARNAT-2000, el pH de los residuos de este estudio realizados a 450°C (Tabla 4), el 8.3 de álamo es medianamente alcalino, mientras que el 8.8 de agave y 9.3 de olote es fuertemente alcalino. Los biochar con una alta cantidad de minerales o ceniza tienden a tener valores más altos a los que tienen una baja cantidad de cenizas (Lehmann *et al.*, 2011), además los biochar que tienen una alta cantidad de carbonatos son mejores en reducir la acidez del suelo y por lo tanto tienen una

mayor influencia en la fertilidad del suelo (Steiner *et al*, 2007 en: McElligott, 2011). Los biochar de agave y de olote tuvieron un contenido de cenizas mayor que el biochar de álamo, por lo que tuvieron un pH mayor, sin embargo a pesar de que el biochar de agave tuvo la mayor cantidad de cenizas no fue el que resultó con el mayor pH. A pesar de esto, al parecer el biochar de agave tiene una gran cantidad de carbonato de calcio pues tiene un alto contenido de Ca (23,677 ppm), por lo que podría ser una mejor enmienda para suelos ácidos pero no para suelos alcalinos. Según Carrier *et al* (2013) una proporción equivalente de hemicelulosa y lignina puede disminuir el pH, mientras que una mayor proporción de celulosa puede aumentar el pH, en los residuos de este estudio, mientras más celulosa hubo sus respectivos biochar tuvieron un pH más alto.

Tabla 4. pH y conductividad eléctrica (C.E.) de biochar de viruta de álamo, olote y bagazo de agave.

Sustrato de biochar	pH	C.E (dS/m)
Álamo	8.3±0.04	0.16±0.00
Olote	9.3±0.02	1.81±0.04
Agave	8.8±0.03	0.57±0.02

7.3.3. C.E. de biochar

Los investigadores se han enfocado en analizar el pH y la capacidad de intercambio catiónico principalmente, sin embargo algunos autores han analizado la C.E. también. Resultados de C.E. con pirólisis lenta han sido reportados desde 0.05 hasta 9.3 dS/m, por lo que los resultados de C.E. de los residuos de este estudio se encuentra dentro de ese rango, pues va desde 0.16 dS/m para álamo, 0.57 dS/m para agave, hasta 1.81 dS/m del olote (Tabla 4). La mayoría de las compostas tienen niveles de 1-10 dS/m mientras que los suelos de 0-1.5 dS/m (US Compost Council, 2010), sin embargo, para la NOM-021-SEMARNAT-

2000, el biochar de álamo y de agave tiene efectos insignificantes de salinidad mientras que el de olote tiene efectos muy ligeramente salinos.

7.3.4. CIC y cationes intercambiables de biochar

La capacidad de intercambio catiónico (CIC), es una de las características más importantes del biochar, debido a que permite que los nutrientes estén más disponibles para las plantas (McElligott *et al.*, 2011). Existen pocos estudios con altos niveles de CIC, que hayan sido más altos que las arcillas (2-150 meq/100g), y la materia orgánica de los suelos (200 meq/100g ó más) (Martínez *et al.*, 2008; Sohi *et al.*, 2009; Yuan *et al.*, 2011; Manyà, 2012). Generalmente la CIC de los biochar frescos es relativamente baja, si se compara con la materia orgánica del suelo, pero tiende a aumentar con el tiempo a medida que envejece el biochar (Cheng *et al.*, 2008; Laird *et al.*, 2010; Lehmann *et al.*, 2011), sin embargo, sigue siendo más alta que los suelos arenosos tropicales degradados (Carter *et al.*, 2013). La capacidad del biochar para retener nutrientes, se ha atribuido a la oxidación de las superficies del biochar, su gran área superficial que provee de sitios de absorción para los nutrientes, su gran carga negativa superficial, una gran densidad de carga y su gran porosidad compuesta de micro y macroporos que pueden absorber la solución que acarrea a los nutrientes (Liang *et al.*, 2006; Cheng *et al.*, 2006; Bruun, 2011; Lehmann *et al.*, 2011). La información de la CIC del biochar está limitada principalmente por la disponibilidad de materiales producidos de una gran cantidad de materias primas bajo diferentes condiciones de producción, y los estudios que han sido realizados se basan en la comparación de suelos enmendados con biochar con los que no lo están, pero muy pocos analizan la CIC y los cationes intercambiables en sólo el biochar (Liang *et al.*, 2006; Sohi *et al.*, 2009). De manera general, se pueden encontrar valores de CIC de biochar desde 4.6 hasta 122 meq/100g. A pesar que se menciona que bajo cualquier escenario de producción la CIC de un biochar fresco es relativamente bajo (Lehmann *et al.*, 2007), Yuan *et al.* (2011) publicó una CIC de hasta 304 meq/100g en un biochar de rastrojo de maíz. Los valores de CIC de los biochar de este estudio (Tabla 5) van desde 23.7 meq/100g para el álamo el cual resultó con el valor más bajo, 26.3 meq/100g para el agave y hasta 27 meq/100 para el olote con el mayor valor de los tres, los cuales se encuentran dentro del rango mencionado, y que para la NOM-021-SEMARNAT-2000 para suelos, tienen una CIC alta, pero es baja si se

compara con las vermiculitas que pueden llegar hasta 150 meq/100g o la materia orgánica que puede tener hasta más de 200 meq/100g (Martínez *et al.*, 2008). Una alta cantidad de minerales o cenizas en la biomasa, genera un aumento en la CIC de los biochar (Gaskin *et al.*, 2008; Lehmann *et al.*, 2011), esto sucedió en este estudio, pues los biochar de agave y olote en general tuvieron mayor cantidad de cenizas y por lo tanto una mayor CIC que el álamo.

El biochar tiene una gran capacidad para absorber y retener cationes de manera intercambiable, debido a su gran área superficial y a sus cargas negativas superficiales (Liang *et al.*, 2006; McElligott, 2011). En este estudio, el biochar de olote de maíz fue el que tuvo la mayor cantidad de potasio intercambiable entre los tres biochar (14.65 meq/100g) mientras que el biochar de agave fue el que tuvo la menor cantidad (0.98 meq/100g), probablemente debido a la mayor concentración de K del biochar de olote, como nutriente (1942 ppm). En cuanto a sodio, el biochar de agave fue el que tuvo la mayor cantidad (0.29 meq/100g) y el de olote de maíz la menor (0.15 meq/100g), sin embargo, al parecer, el biochar de agave (0.17 meq/100g) y el de álamo intercambiaron más el Na a pesar de que el biochar de olote de maíz tuvo la mayor concentración como nutriente de Na (137 ppm). La misma tendencia ocurrió con el catión de magnesio, cuando el biochar de olote tuvo la mayor cantidad de Mg intercambiable y también la mayor cantidad de Magnesio como nutriente, y el biochar de álamo fue el que tuvo la menor cantidad de magnesio intercambiable al igual que la concentración total del macronutriente. La tendencia fue muy similar para el catión intercambiable de calcio, en este caso el que tuvo la menor concentración de calcio fue el biochar de olote (0.71 meq/100g), teniendo también la menor concentración de calcio como nutriente (Tabla 5), sin embargo, se debe resaltar la gran cantidad de calcio intercambiable del biochar de agave ya que obtuvo 110 meq/100g, y debido a esta cantidad, la suma de los cationes intercambiables, supera por más de cuatro veces la CIC. Según Glaser *et al.* (2002), esto se puede deber a que la mayoría de los cationes de las cenizas que se encuentran en el biochar no están ligadas a fuerzas electrostáticas y más bien se encuentran disueltas como una sal, en el caso del calcio, podría ser como carbonato de calcio, y por lo tanto están más fácilmente disponibles para que las plantas lo tomen. Por esto, Glaser concluyó que el biochar puede actuar no solo como una enmienda incrementando la CIC, sino también como un fertilizante. Chan *et al.*,

2007, Asai, *et al*, 2009 y Van zwieten *et al.*, 2010, analizaron los cationes intercambiables de biochar de pirólisis lenta de residuos verdes, madera y de papel, respectivamente, que para Ca se presentaron en un rango de 0.4 a 11 meq/100g, para el K de 0.22 a 21 meq/100g, para el Mg de 0.56 a 2.6 meq/100g y el Na de 0.95 a 3.7 meq/100g. Los valores de Ca de los biochar de este estudio se encuentran dentro del rango mencionado, a excepción del biochar de agave (110 meq/100g), que fue 10 veces mayor que el valor más alto. Además, Van Zwieten *et al*, 2010, analizaron la capacidad del biochar para “encalar”. Si se evaluara el efecto de encalado en el biochar de agave, podría ser mucho mayor que el biochar de los residuos de papel.

7.3.5. Nutrientes en biochar

Las condiciones en las que se maneja la pirólisis y la materia prima utilizada también afecta la composición del biochar, produciendo diferencias significativas en el contenido y disponibilidad de los nutrientes para las plantas Gaskin *et al.*, 2007; Sparkes y Stoutjesdijk, 2011). Los biochar derivados de estiércol y de animales son relativamente ricos en nutrientes si se comparan con los de plantas. De los biochar producidos de plantas, los de madera generalmente tienen niveles bajos de nutrientes mientras que los de hojas y de residuos de alimentos procesados tienen niveles más altos de nutrientes. Sin embargo, el biochar más que incrementar la cantidad de nutrientes en el suelo, permite que el suelo almacene o retenga nutrientes, lo que podría reducir la lixiviación de los mismos (Sparkes and Stoutjesdijk, 2011). En general, el biochar de olote tuvo los valores más altos en el contenido de nutrientes (Tabla5), mientras que el álamo tuvo los valores más bajos. El biochar de olote se distinguió principalmente en los nutrientes de K (1942 ppm), P (256 ppm) y N (6482 ppm), mientras que el biochar de agave lo hizo con el Ca (23677 ppm), el N (6440) y el Cu (4.07 ppm) y el biochar de álamo sólo tuvo el valor más alto en Mn (5.30 ppm). En general los valores de los nutrientes de este estudio fueron muy bajos al compararlos con los biochar de gallinaza de pollo y de cáscara de cacahuate (Gaskin *et al.*, 2008; Revell, 2011) al igual que en biochar de residuos agroforestales, pellets de viruta de madera, de madera dura y bambú (Gaskin *et al.*, 2007; Dumroese, *et al.*, 2011; Henreaux, 2012). No se encontró en otros estudios un valor de P tan bajo como el que obtuvo el

biochar de agave, sin embargo, ningún biochar de los estudios revisados tiene tanta cantidad de Ca como el biochar de agave (Gaskin *et al.*, 2008; Hoshi, 2001; Lehmann *et al.*, 2003, Major *et al.*, 2010; Revell, 2011).

Tabla 5. Macronutrientes (K, Na, Ca, Mg, N y P), micronutrientes (Cu, Zn, Fe y Mn), Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) y cationes intercambiables (CIN) de K, Na, Ca y Mg de los de biochar de álamo, olote y agave.

Biochar	Álamo	Olote	Agave
K (ppm)	195±1.47	1942±1.83	108±0.50
Na (ppm)	116±0.33	137±0.50	123±0.25
Ca (ppm)	247±14.81	68±8.21	23677±344.37
Mg (ppm)	44±0.17	112±0.26	71±0.09
P (ppm)	72.08±0.68	256.33±0.44	18.33±0.35
N (ppm)	2577±336.67	6482±127.11	6440±161.66
Cu (ppm)	0.67±0.03	0.87±0.03	4.07±0.03
Zn (ppm)	2.59±0.16	7.54±0.23	3.14±0.10
Fe (ppm)	5.73±0.47	13.23±0.49	10.03±0.35
Mn (ppm)	5.30±0.10	0.27±0.03	2.37±0.23
CIC (meq/100g)	23.7±3.67	27.0±0.33	26.3±1.67
CIN K (meq/100g)	1.31±0.02	14.65±0.09	0.98±0.07
CIN Na (meq/100g)	0.17±0.00	0.15±0.00	0.29±0.47
CIN Ca (meq/100g)	1.93±0.10	0.71±0.04	110.00±3.08
CIN Mg (meq/100g)	0.34±0.00	1.12±0.02	0.85±0.07

7.4. Caracterización física de biochar

7.4.1. Densidad aparente y real de biochar

La densidad aparente del biochar, fue más baja en comparación a la de los suelos minerales reportados por McElligott *et al* (2011) (1.3 Mg m^{-3}), pues el biochar contiene micro y macro poros que pueden tener aire, reduciendo la densidad de toda la partícula, sin embargo, poco se ha publicado acerca de la densidad del biochar. En cuanto a la densidad real, se menciona que existe un rango entre 1.5 y 2.1 Mg m^{-3} , mientras que de la densidad aparente se han publicado datos desde 0.09 hasta 0.5 Mg m^{-3} , no obstante, pueden variar por el tipo de materia prima y el proceso de pirólisis utilizados (Downie *et al.*, 2009; Brewer *et al.*, 2009; Lehmann *et al.*, 2011). Para el biochar de las maderas se han presentado un rango desde 0.11 hasta 0.19 Mg m^{-3} (Antal y Grønli, 2003), por lo que en la viruta de álamo, en este estudio, se encuentra dentro de los valores mencionados (0.17 Mg m^{-3}). La densidad aparente más alta en el presente estudio fue la del biochar de olote (0.22 Mg m^{-3}), valor muy similar a los reportados por Ogunjobi y Lajide (2013), en olote amarillo (0.22 Mg m^{-3}) y blanco (0.26 Mg m^{-3}). Por otro lado, la densidad real de los biochar de este estudio (0.36 a 0.62 Mg m^{-3}) fue muy bajo comparado a otros valores (1.5 a 2.1 Mg m^{-3}) (Lehmann *et al.*, 2011). Esto puede ser debido a la metodología empleada en este estudio, pues el agua no puede penetrar a poros tan pequeños o cerrados o a superficies que son hidrofóbicas en el biochar (Amonette y Joseph, 2009; Downie *et al.*, 2009 Bruun, 2011 Brewer *et al.*, 2014), una metodología más correcta sería utilizar un picnómetro de helio como en Brewer *et al.*, 2009, 2012 y 2014, en donde se asume que el helio penetra a todos los poros abiertos de la partícula del biochar. El biochar de agave fue el sustrato que tuvo la mayor densidad real, esto puede ser debido a que son fibras y su porosidad es menor en comparación a otros sustratos (Crespo-González *et al.*, 2013). El biochar de olote tuvo una mayor disponibilidad de agua, quizá debido a una mayor cantidad de meso y macroporos (Downie *et al.*, 2009; Major *et al.*, 2009) y a una densidad aparente más alta (0.22 Mg m^{-3}). El biochar de álamo tuvo la menor densidad real (Tabla 6) entre los tres sustratos, lo que se atribuye a la porosidad de las estructuras celulares originales, a sus diferentes tamaños y formas ya que gran parte de la estructura original se mantiene después de la pirólisis (Brewer *et al.*, 2014), además de que los biochar de maderas tienden a tener

mayores proporciones de meso y macroporos que los de herbáceas (Brunn, 2011). De la misma forma, los minerales que son más densos que la mayoría de las formas de carbón también pueden influir en la densidad real, en este estudio los biochar que resultaron con mayor cantidad de minerales tendieron a tener una densidad real mayor (Brewer, *et al.*, 2009).

Tabla 6. Densidad aparente y densidad real promedios; de biochar de viruta de álamo, olote y bagazo de agave.

Sustrato de biochar	Densidad aparente (Mg m⁻³)	Densidad real (Mg m⁻³)
Álamo	0.17±0.00	0.36
Olote	0.22±0.00	0.59
Agave	0.19±0.01	0.62

7.5. Experimento 1. Etapa de evaluación en charola

7.5.1. Efecto de sustratos (biochar y peat moss) en el desarrollo vegetativo de plántulas de pepino.

En este estudio el biochar de álamo no tuvo efecto favorable para el desarrollo de las plántulas de pepino. Hubo una tendencia a tener más peso seco en tallos, hojas y raíz mientras más proporción de biochar pero no hubo una diferencia significativa en comparación al control. Solo el tratamiento de 20% álamo tuvo una mayor altura (40%) y volumen de raíces (71%) con respecto al control (Tabla 7) (Fig 1.) Aunque el pH se incrementó un poco con más proporción de biochar de álamo no causó una diferencia estadística al igual que la conductividad eléctrica. El pH debió haber influido en la disponibilidad de macronutrientes en las hojas de los tratamientos de álamo con respecto al control, a excepción del P, sin embargo, las plantas no se desarrollaron más que en el control. Las plantas de pepino pueden crecer en un rango de pH óptimo de 5.5 -7, y pueden soportar un pH de 7.5 (<http://www.bio-nica.info/biblioteca/pepino%20guia%20tecnica.pdf>), fuera de ese rango es posible que las plantas disminuyan su desarrollo. Las plántulas de todos los tratamientos de olote tuvieron una mayor altura y peso seco del tallo, peso de hojas y un mayor peso seco, así como volumen de raíces comparado al control. La altura de los tallos fue mayor en un 39% en el tratamiento de 5% olote, 46% en el de 10% y 79% en el de 20%. El peso seco de las hojas y tallos del 27 de febrero (Fig. 1), se incrementó con respecto al control, 43%, 51% y 81% en los tratamientos de 5%, 10% y 20% con olote, respectivamente. Posteriormente, cuando se tomaron de nuevo muestras de peso seco de tallos y hojas el 20 de marzo (Fig. 1), la diferencia fue menor, pero siguieron siendo significativamente mayores que el control, el peso fue 28% más en el tratamiento de 5% olote mientras que en los de 10 y 20% fue de 44% más. El peso de las raíces fue 33% más en el tratamiento de 5% olote y 55% más en los tratamientos de 10% y 20% olote (Fig. 2). Mientras tanto, el volumen de las raíces fue alrededor de 2 veces más en los tratamientos de olote que en el control (Fig.3). La longitud de la raíz y el diámetro del tallo fueron significativamente mayores que el control en los tratamientos de 10% y 20% olote, y se incrementaron 25 y 20% y 19 y 14% respectivamente, en comparación al control, esto se debe probablemente a la mayor cantidad de macronutrientes (K, Ca y Mg) que estuvieron

más disponibles gracias al biochar y su mayor capacidad de intercambio catiónico que se manifestaron en las hojas al igual que los micronutrientes que tendieron a abundar más en los tratamientos de olote que en el control. A diferencia de los tratamientos de biochar de olote, el peso seco y volumen de raíces del biochar de agave tendieron a disminuir mientras más biochar a pesar de que fueron significativamente mayores al control. Por otro lado, las plantas de los tratamientos de agave tuvieron un mayor desarrollo significativo en la altura y el tallo, en el peso seco de tallos y hojas. La altura del tallo de los tratamientos de agave creció 1.7% más que el control. El peso seco de tallos y hojas del 27 de febrero en los tratamientos de 5, 10, 20 % agave, se incrementó 68%, 72% y 86%, respectivamente con respecto al control (Fig. 1), en la fecha del 20 de marzo, esa diferencia disminuyó, sin embargo, el porcentaje se mantuvo en 53%, 36% y 41%, respectivamente. El diámetro del tallo fue 10% y 16% mayor en los tratamientos de 5% agave y 20% respectivamente en comparación al control. Las raíces en los tratamientos de 5%, 10% y 20% agave aumentaron su volumen 104, 76 y 66%, respectivamente, con respecto al control (Fig.3). La CIC que depende de la materia orgánica y sustancias húmicas varía con el pH (Martínez *et al.*, 2008), al ser el biochar un sustrato orgánico también depende del pH. Aunque no se analizó la CIC en este experimento, es muy probable que con el aumento del pH, haya aumentado también y debido a esto, los nutrientes fueron más disponibles al haber más biochar, pues hubo un aumento de casi 3 veces en la cantidad de macronutrientes entre los tratamientos de 5% y 10% agave y el tratamiento de 20% agave (Tabla 8). El pH de los lixiviados aumentó de 4.7 para el control a un pH de 5.8 en el tratamiento de 5% agave, después pasó a un pH de 6.8 con 10% agave y hasta 7.8 en el tratamiento de 20% agave. Por tanto, las plantas de los tratamientos que tenían biochar de agave, se desarrollaron en un rango de pH muy similar al óptimo, ésta es una de las razones por las que las plantas de pepino se desarrollaron mejor que en el control y en los otros tratamientos con biochar. Algo que caracterizó a las plántulas que crecieron en los tratamientos de biochar de agave, es que desde el principio, las plántulas crecieron muy parejas, a diferencia de los tratamientos de biochar de olote en donde había una mayor heterogeneidad entre las plantas que crecieron con una mayor proporción de biochar y las que tenían más baja proporción. La conductividad eléctrica por otro lado no resultó con diferencias significativas en ninguno de los tratamientos con biochar con respecto al control (Tabla 7).

Tabla 7. Altura, diámetro de tallo y longitud de raíz de plántulas de pepino; pH y conductividad eléctrica de lixiviados del 27 de febrero de 2014.

Tratamiento		Altura de tallo (cm)	Diámetro de tallo	Longitud de raíz (cm)	pH de Lixiviados	C.E. de lixiviados
Control		5.7±0.15 ^b	5.45±0.13 ^a	12.8±0.39 ^a	4.7±0.07 ^a	0.2±0.08 ^a
Álamo	5%	5.7±0.46 ^b	5.27±0.21 ^a	11.9±0.43 ^a	4.8±0.12 ^a	0.1±0.01 ^a
	10%	5.7±0.37 ^b	5.07±0.17 ^a	13.1±0.50 ^a	4.7±0.03 ^a	0.1±0.01 ^a
	20%	8.0±0.26 ^a	5.68±0.17 ^a	13.7±0.49 ^a	5.0±0.06 ^a	0.1±0.01 ^a
Control		5.7±0.15 ^c	5.45±0.13 ^c	12.8±0.39 ^b	4.7±0.07 ^b	0.2±0.08 ^a
Olote	5%	7.9±0.27 ^b	5.78±0.17 ^{bc}	13.7±0.26 ^b	4.8±0.00 ^b	0.1±0.01 ^a
	10%	8.3±0.18 ^b	6.50±0.19 ^a	16.0±0.42 ^a	4.7±0.07 ^b	0.1±0.01 ^a
	20%	10.2±0.30 ^a	6.21±0.16 ^{ab}	15.3±0.42 ^a	5.2±0.10 ^a	0.1±0.01 ^a
Control		5.7±0.15 ^b	5.45±0.13 ^c	12.8±0.39 ^a	4.7±0.07 ^d	0.2±0.08 ^a
Agave	5%	9.7±0.45 ^a	6.03±0.21 ^{ab}	13.5±0.51 ^a	5.8±0.18 ^c	0.1±0.01 ^a
	10%	9.6±0.52 ^a	5.84±0.11 ^{bc}	13.6±0.42 ^a	6.8±0.03 ^b	0.1±0.01 ^a
	20%	9.9±0.27 ^a	6.31±0.18 ^a	12.7±0.47 ^a	7.8±0.03 ^a	0.2±0.02 ^a

Tratamientos con la misma letra son estadísticamente iguales (P<0.05).

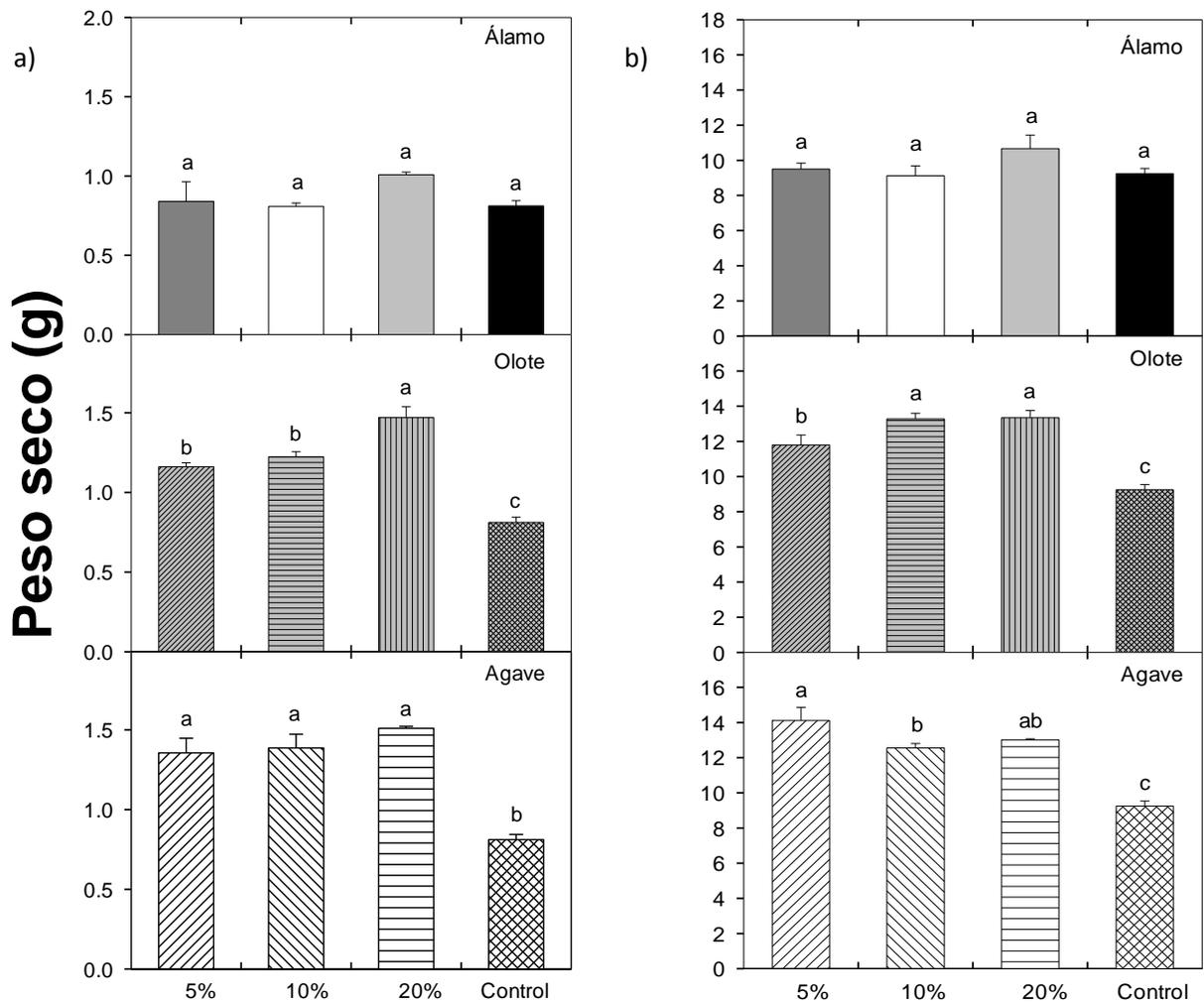


Figura 1. Peso seco en gramos. a) Tallos y hojas promedio de plántulas de pepino del 27 de febrero de 2014. b) Tallos y hojas promedio de plántulas de pepino del 20 de marzo de 2014, con fertilizante. Tratamientos con la misma letra son estadísticamente iguales ($P < 0.05$).

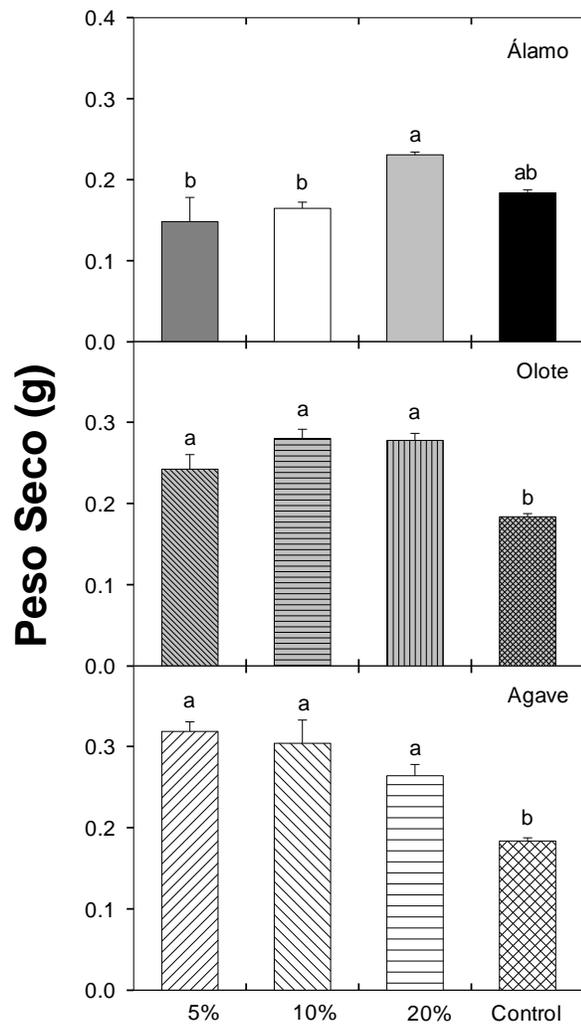


Figura 2. Peso de raíz en gramos (g) promedio de plántulas de pepino del 27 de febrero de 2014.

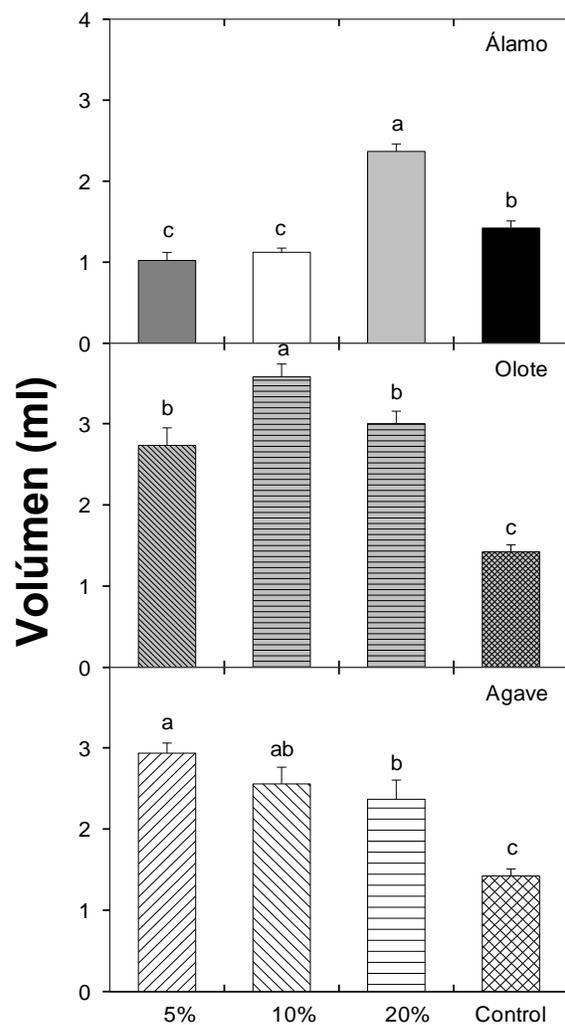


Figura 3. Volumen (mL) promedio de raíz de pepino del 27 de febrero de 2014.

Tratamientos con la misma letra son estadísticamente iguales ($P < 0.05$)

7.5.2. Determinación de clorofilas en unidades SPAD

Se han realizado muy pocos estudios con biochar, en el que se valore la clorofila de las plantas y cultivos con SPAD (Asai *et al.*, 2009; Quilliam *et al.*, 2012; Abenza, 2012; Tammeorg *et al.*, 2014), algunos de estos no han reportado sus resultados, y particularmente con el cultivo del pepino. En otros, se ha visto que la disminución del SPAD está relacionada con una alta relación de C/N del biochar (Asai *et al.*, 2009; Tmmaeorg *et al.*, 2014), así como se ha reportado que ésta puede limitar el desarrollo de las plantas (Chan *et al.*, 2007; Bruun, 2011; Lehmann *et al.*, 2011). El valor SPAD, no solo indica la concentración de pigmentos (clorofila a y b), sino que también se relaciona con la concentración de nitrógeno en la planta, por lo que a su vez indica la concentración de nitrógeno en el suelo disponible para las mismas (Abenza, 2012). Las unidades SPAD en hojas de plantas de pepino normalmente son alrededor 40-60 (Trejo-Téllez *et al.*, 2003; Aguilar, 2011; Pérez, 2012; Colla *et al.*, 2012), sin embargo, depende de la variedad de pepino, el sustrato en el que se desarrolla y las variables ambientales. Desde el inicio del primer experimento, las plantas de pepino en los tratamiento de álamo tuvieron un desarrollo limitado, hasta que se aplicó fertilizante se comenzó a observar un mejor desarrollo. Los tratamientos de álamo fueron iguales al control, pero las unidades SPAD fueron menores mientras incrementó la proporción de biochar (Fig. 4). En la segunda fecha, los tratamientos de álamo fueron de nuevo iguales que el control (Fig. 5). Pero, la planta de pepino en estos tratamientos siguió con menor desarrollo con respecto a los demás tratamientos o muy parecido al control. Los valores SPAD en las hojas de los tratamientos de olote y de agave en la primera fecha, fue menor que los del control. En la segunda fecha los tratamientos de 5% olote y 10% agave fueron ligeramente mayores que el control, sin embargo todos los tratamientos de olote y agave fueron similares, esta semejanza puede ser debida a que las plantas estaban todavía en un contenedor reducido por lo que su desarrollo se disminuyó.

Clorofila (SPAD)

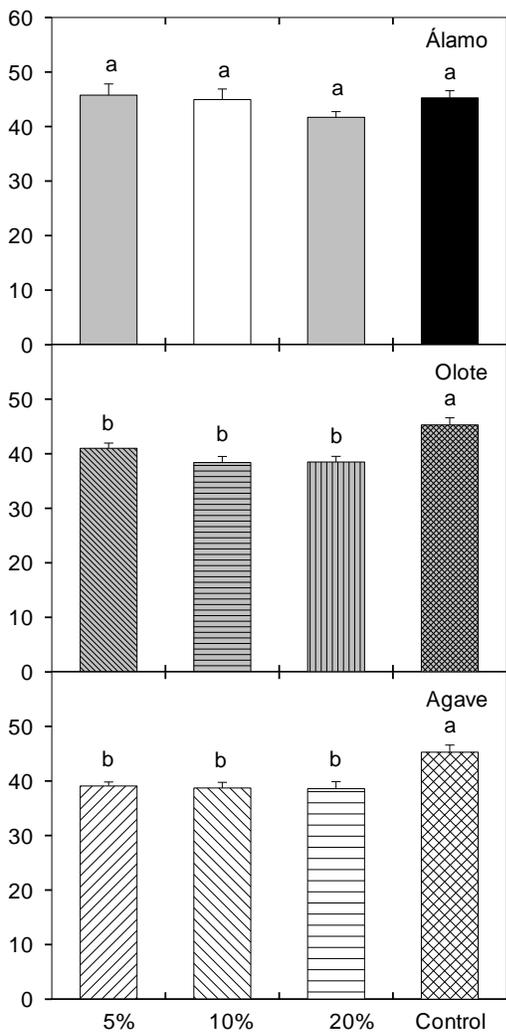


Figura 4. Clorofila (SPAD) promedio de plántulas de pepino del 25 de febrero de 2014.

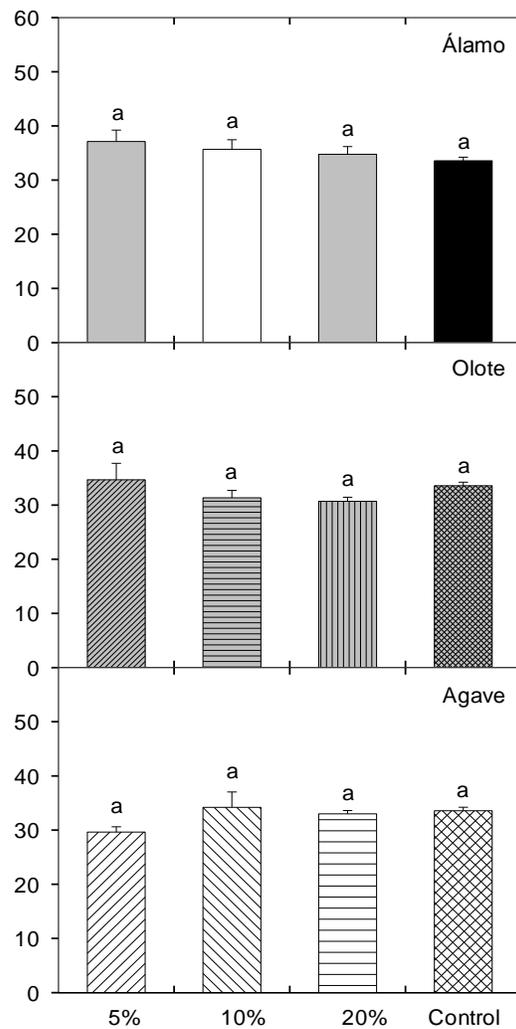


Figura 5. Clorofila (SPAD) promedio de plántulas de pepino del 19 de marzo de 2014.

Tratamientos con la misma letra son estadísticamente iguales ($P < 0.05$)

7.5.3. Nutrientes en hojas y tallos de pepino (Biochar y Peatmoss)

Existe un rango nutrimental en donde las plantas se desarrollan de manera óptima, pues en este rango no hay un mayor aumento o disminución del crecimiento (Alcántar y Trejo-Téllez, 2009). Los nutrientes foliares de este estudio se compararon con los rangos de suficiencia nutrimental para pepino, establecidos por Sánchez, 2009 y Laboratorios A-L., 2011, pero factores como el tipo de sustrato, las variables ambientales, la variedad del cultivo, pueden hacer que varíe el rango. Los nutrientes de K y Ca de las plántulas que crecieron en los tratamientos de álamo tuvieron hasta 55% más K y tuvieron más de 10.5 veces Ca que el control (Tabla 8). El Mg sí estuvo dentro del rango de suficiencia nutrimental y fue hasta 12 veces más que el control. Por otro lado, los tratamientos de olote aumentaron significativamente el K mientras más proporción de biochar, el tratamiento de 20% olote tuvo 2.4 veces más que el control y fue el único tratamiento incluyendo a los de agave y álamo que se encuentra dentro del rango de suficiencia nutrimental. El Ca en los tratamientos de olote disminuyó mientras más proporción de biochar, el tratamiento de 5% olote tuvo 11 veces más Ca, en cambio el Mg, en los tres tratamientos fue alrededor de 10 veces significativamente mayor que el control, y estuvo dentro del rango de suficiencia nutrimental. Por otro lado, los tratamientos de 5% y 10% agave fueron menores que el control en los macronutrientes de K, Na, Ca y Mg. El P tendió a disminuir en todos los tratamientos a los que se les aplicó biochar, sin embargo, estuvieron por encima del rango de suficiencia nutrimental incluyendo al control. El N también tendió a disminuir en los tratamientos que tenían biochar, con respecto al control, excepto en los tratamientos de 5% y 10% álamo en los que aumentó. A pesar de que el Na no es un nutriente esencial, fue alto en todos los tratamientos con biochar con respecto al control. Existen antagonismos entre nutrientes que evitan que se desarrolle la planta de manera adecuada (Alcántar y Trejo-Téllez, 2009). Es muy claro que existe una mayor disponibilidad de los cationes K, Na, Ca y Mg, mientras más proporción de biochar. No obstante, es muy probable que la disminución de algunos nutrientes pudo ser debido al momento en que se colectaron las plantas, ya que en los tratamientos con biochar ya habían empezado a florecer y a fructificar por lo que pudieron transportarlos a esas estructuras a diferencia del control que solo empezó a florecer.

Tabla 8. Macronutrientes en hojas de pepino del 20 de Marzo de 2014

Tratamiento		K (ppm)	Na (ppm)	Ca (ppm)	Mg (ppm)	P (ppm)	N (ppm)
Control		12158±77.21 ^c	238±1.19 ^c	1179±12.41 ^d	401±2.36 ^d	21839±120.54 ^a	25480
Álamo	5%	18153±43.75 ^b	3373±8.98 ^a	12079±9.73 ^b	4819±3.71 ^a	21147±17.17 ^{ab}	26902
	10%	18779±17.77 ^a	2882±3.47 ^b	12343±32.09 ^a	4231±10.44 ^b	20512±550.04 ^b	25804
	20%	18724±19.94 ^a	2866±13.60 ^b	10506±20.67 ^c	3504±3.22 ^c	18729±30.34 ^c	24640
Control		12158±77.21 ^d	238±1.19 ^c	1179±12.41 ^d	401±2.36 ^d	21839±120.54 ^a	25480
Olate	5%	17868±24.76 ^c	2893±27.71 ^a	13245±39.59 ^a	4120±6.29 ^b	18926±62.98 ^d	24231
	10%	19411±23.33 ^b	2921±32.97 ^a	12263±11.6 ^b	4230±5.88 ^a	20580±40.27 ^b	23240
	20%	29226±42.67 ^a	2323±5.62 ^b	9357±8.87 ^c	3232±5.96 ^c	19780±87.91 ^c	23154
Control		12158±77.21 ^b	238±1.19 ^d	1179±12.41 ^d	401±2.36 ^d	21839±120.54 ^a	25480
Agave	5%	6641±5.98 ^c	949±3.31 ^b	6358±17.71 ^b	1656±4.32 ^b	20304±90.45 ^b	24000
	10%	4615±10.43 ^d	610±1.25 ^c	5273±37.54 ^c	1214±1.36 ^c	19503±65.42 ^c	21396
	20%	18530±73.61 ^a	2169±16.55 ^a	23410±34.28 ^a	4590±12.10 ^a	17574±87.15 ^d	21538

Tratamientos con la misma letra son estadísticamente iguales (P<0.05).

Por otro lado, en cuanto a los micronutrientes de la misma fecha, el cobre fue estadísticamente más alto en el control (5 ppm) que en los tres tratamientos de álamo, sin embargo, de estos tres el de 5% álamo (3.76 ppm) fue el que tuvo la mayor concentración. En cambio, en olote, los tres tratamientos fueron significativamente diferentes entre ellos y con respecto al control, sin embargo, el 10% olote (5.79 ppm) fue el tratamiento con la mayor concentración de cobre. En agave, el cobre tendió a mostrar una mayor concentración mientras más proporción de biochar, sin embargo, los tratamientos de control, 5% y 20% agave fueron estadísticamente iguales y sólo el de 10% agave fue diferente al resto, con la mayor concentración de cobre (6.11 ppm). El manganeso también tendió a disminuir mientras más biochar en los tratamientos de álamo, por lo que el control resultó ser significativamente mayor a los tres tratamientos de álamo. En los tratamientos de olote, no se observó una tendencia clara sin embargo todos fueron estadísticamente mayores al control, 10% olote (36.58 ppm) fue el que tuvo la mayor concentración de manganeso. En agave, la concentración de manganeso tendió a disminuir de mayor proporción de biochar. Con respecto al zinc, los tratamientos de olote, tuvo un comportamiento similar, pues el control (51.13 ppm) fue el que tuvo la mayor concentración; los tratamientos de olote no tuvieron una tendencia clara pero siendo significativamente diferentes entre ellos y al control, el de 20% fue el que tuvo el mayor contenido de zinc (54.90 ppm), le siguió el control, y el de menor fue 5% olote (33.97

ppm). Al contrario, en los tratamientos agave, el zinc tendió a aumentar mientras más proporción de biochar y todos los tratamientos fueron significativamente diferentes entre ellos, incluyendo al control, por lo que el tratamiento con la mayor concentración de zinc fue 10% agave (70.66 ppm), y con la menor fue el control (51.13 ppm). Finalmente en cuanto al fierro, aunque tendió a disminuir en los tratamientos de álamo mientras más proporción de biochar, el control fue estadísticamente similar a 10% álamo. Por el contrario, el fierro en todos los tratamientos de olote aumentaron con más proporción de biochar, por lo que el tratamiento de 20% olote fue el mayor (301.76 ppm) y el tratamiento con el promedio más bajo fue el control (237.19 ppm). En cambio, aunque los tratamientos de agave fueron estadísticamente distintos entre ellos y al control, no hubo una tendencia clara, 5% fue el de mayor concentración de fierro (309 ppm) y el de menor concentración fue 20% agave (132 ppm) (Tabla 9).

Tabla 9. Micronutrientes en hojas de pepino del 20 de marzo de 2014.

Tratamiento		Cu (ppm)	Mn (ppm)	Zn (ppm)	Fe (ppm)
Control		5.00±0.17 ^a	30.84±0.5 ^a	51.13±0.11 ^a	237.19±0.95 ^a
Álamo	5%	3.76±0.13 ^b	29.33±0.2 ^b	50.12±0.27 ^b	228.73±1.38 ^b
	10%	2.05±0.08 ^c	23.22±0.1 ^d	34.94±0.06 ^d	239.92±0.58 ^a
	20%	2.45±0.37 ^c	24.89±0.0 ^c	36.03±0.01 ^c	216.82±0.18 ^c
Control		5.00±0.17 ^b	30.84±0.5 ^d	51.13±0.11 ^b	237.19±0.95 ^d
Olote	5%	2.16±0.00 ^d	33.83±0.0 ^b	33.97±0.03 ^d	275.67±0.23 ^b
	10%	5.79±0.24 ^a	36.58±0.2 ^a	46.97±0.45 ^c	271.58±1.87 ^c
	20%	4.29±0.18 ^c	32.44±0.0 ^c	54.90±0.06 ^a	301.76±0.37 ^a
Control		5.00±0.17 ^b	30.84±0.5 ^a	51.13±0.11 ^d	237.19±0.95 ^c
Agave	5%	5.10±0.07 ^b	31.26±0.2 ^a	52.23±0.16 ^c	309.20±1.82 ^a
	10%	6.11±0.24 ^a	21.85±0.4 ^b	70.66±0.51 ^a	289.76±1.00 ^b
	20%	4.98±0.06 ^b	22.74±0.0 ^b	54.18±0.09 ^b	132.01±0.52 ^d

Tratamientos con la misma letra son estadísticamente iguales (P<0.05).

7.6. Experimento 2. Etapa de evaluación en maceta

7.6.1. Materia orgánica en suelos enmendados por biochar

La materia orgánica procede de compuestos orgánicos, principalmente de origen vegetal pero también animal, con diferentes etapas de descomposición gradual a causa de la transformación química, física y biológica, en donde el carbón pirógeno es la fracción más recalcitrante. (Maia *et al.*, 2011; Sparkes y Stoutdjesdijk, 2011). La materia orgánica que se añade al suelo mejora la retención de nutrientes que son esenciales para el crecimiento de las plantas, la reducción de la densidad aparente, la capacidad de retención de agua, la porosidad y la agregación del suelo (Crespí *et al.*, 2007; Downie *et al.* 2009; Abenza, 2012). Sin embargo, la materia orgánica añadida al suelo está compuesta de fracciones lábiles que se descomponen rápidamente debido a la mineralización de los microorganismos, y son liberadas a la atmósfera en 1 a 10 años en forma de CO₂ (Collison, 2009; Gaunt y Driver 2012). El tiempo de residencia del biochar no es conocido y difícil de determinar, sin embargo, la estabilidad del biochar es mucho mayor que otras enmiendas orgánicas bajo las mismas condiciones ambientales (Cheng *et al.*, 2006; McElligott, 2011). Existe preocupación acerca de la adición de biochar a los suelos, pues podría acelerar la descomposición de la materia orgánica del suelo (Sparkes y Stoutdjesdijk, 2011), como demostró Wardle *et al.* (2008), al perder humus rápidamente en la presencia de carbón vegetal. Sin embargo, otros estudios en cambio, han reportado que no existe degradación de la materia orgánica del suelo, ni disminución de su estabilidad a causa del biochar o carbón vegetal (Bruun y El-Zehery, 2012). Todavía se encuentra bajo especulación si el biochar estabiliza la materia orgánica o lo degrada de manera acelerada, por lo que se necesita más investigación (Sparkes y Stoutdjesdijk, 2011; McElligott, 2011). Biochar añadido a tres tipos de suelos (andisol, spodosol y molisol), a una tasa de 25 Mg ha⁻¹ incrementó la materia orgánica de 5-7% (McElligott, 2011). En un suelo arcilloso con arena fina, el biochar incrementó un 18% la materia orgánica con respecto al mismo suelo de control, cuando se aplicó a una tasa de 11 Mg ha⁻¹ (Brewer *et al.*, 2012). En el presente estudio se encontró que la materia orgánica tendió a disminuir en vez de aumentar mientras más biochar en los tratamientos de álamo, pero fue mayor que el control (Tabla 10). En los tratamientos de olote y agave, la materia orgánica si tendió a aumentar mientras más

proporción de biochar, y el tratamiento de biochar de 5% olote tuvo un 64% de aumento con respecto al control, lo cual fue el menor aumento de todos los tratamientos mientras que el 20% olote tuvo un aumento de 239% con respecto al control, por lo que fue el mayor aumento de todos los tratamientos, 20% agave también tuvo un alto incremento de 171% con respecto al control (Tabla 10). La agricultura de los suelos tropicales enfrenta limitaciones debido a los contenidos bajos en nutrientes, bajas cantidades de materia orgánica del suelo y mineralización acelerada de la misma, en especial en los suelos arenosos (Glaser *et al.*, 2002; Kimetu *et al.*, 2008; Maia *et al.*, 2011). Según la NOM-021-SEMARNAT-2000 el suelo franco arenoso con el que se trabajó tiene bajas cantidades de materia orgánica, sin embargo al añadir el biochar el porcentaje de materia orgánica aumentó en 6 de los 9 tratamientos de enmiendas de suelo. Los biochar evaluados en este estudio, podrían ayudar a mejorar la materia orgánica y por lo tanto la retención de nutrientes de este suelo franco arenoso que se distribuye en el estado de Jalisco, sin embargo, primero se debe investigar más acerca del efecto del biochar en los procesos de mineralización de la materia orgánica del suelo, su participación en la agregación del suelo, entre otras cosas, para prever los efectos negativos que podrían acontecer al añadir el biochar a estos suelos.

7.6.2. CIC en suelos enmendados por biochar

En diferentes estudios, se ha mostrado que el biochar puede incrementar la capacidad de intercambio catiónico y la disponibilidad de los principales cationes en los suelos, lo que puede incrementar la fertilidad edáfica (Lehmann y Rondon, 2006; Steiner *et al.*, 2007; Bruun, 2011). La mayoría de los trabajos se han hecho en suelos tropicales ácidos y altamente degradados, en donde el biochar puede mejorar el pH, la toxicidad del aluminio, la capacidad de intercambio catiónico, la retención de nitrógeno y la retención de agua (Gaskin *et al.*, 2008; Guereña *et al.*, 2012). Por otro lado muchos suelos de climas templados, tienen una suficiente fertilidad, una CIC adecuada y pH neutro, por lo que el biochar no ha incrementado la fertilidad como se ha esperado (Guereña *et al.*, 2012). La capacidad del biochar de retener nutrientes se ha atribuido a la gran área superficial que provee de sitios para la absorción de nutrientes inorgánicos, a la alta cantidad de superficies con cargas negativas debido a la oxidación de grupos funcionales, principalmente ácidos

carboxílicos y fenólicos, a la absorción de ácidos orgánicos o materia orgánica y a su gran porosidad compuesta de micro y macroporos que pueden absorber la solución que acarrea a los nutrientes (Liang *et al.*, 2006; Cheng *et al.*, 2006; Sukartono *et al.*, 2011; Bruun, 2011). Numerosos estudios, que manejaron diferentes residuos y técnicas para la realización de biochar y que se aplicó en diferentes proporciones a diferentes tipos de suelos con y sin fertilizante, tuvieron incrementos en la capacidad de intercambio catiónico y en los cationes intercambiables (Glaser *et al.*, 2002; Lehmann *et al.*, 2003; Steiner, *et al.*, 2007; Chan *et al.*, 2007; Rondon *et al.*, 2007; Van Zwieten *et al.*, 2010) y solamente en algunos estudios estas características químicas no aumentó el valor (Chan *et al.*, 2007; Guereña *et al.*, 2012). En algunos estudios el aumento fue ligero, alrededor de 1 a 3 meq/100g (Lehmann y Rondon, 2006), pero en algunos llegó a incrementar hasta poco más de 6 meq/100g, mientras que en los suelos de Terra preta existe un incremento de hasta 16meq/100g con respecto a sus suelos adyacentes (Liang *et al.*, 2006), un anthrosol de Terra preta al que se le añadió fertilizante se incrementó hasta 19.7 meq/100g (Lehmann *et al.*, 2003). Al igual, la aplicación del biochar a los suelos, no ha causado un gran incremento en los cationes intercambiables. Los valores de CIC de las diferentes mezclas del suelo franco arenoso con los biochar de este estudio (Tabla 10) no tuvieron más de 10 meq/100g, mientras el suelo de Terra preta que tienen algún tipo de carbón, pueden llegar a tener 22 meq/100g. Además la CIC de las mezclas, fue incrementada solo ligeramente por el biochar, sin embargo, se tendió a aumentar un poco más en las mezclas de 20% olote, 5% agave y 20% agave, en comparación al control, pues en estas aumentó hasta 1.4 meq/100g de CIC. En el tratamiento de 10% álamo disminuyó en vez de aumentar, y concidió ser el lugar donde las plantas se vieron inhibidas y crecieron menos, también la CIC de 10% olote disminuyó en vez de aumentar. Los cationes intercambiables de las mezclas de suelo con biochar, en general tendieron a incrementarse en comparación al control (Tabla 10). El catión intercambiable de potasio tendió a ser mayor en los tratamientos de olote, mientras que, el catión intercambiable de sodio tendió a intercambiarse menos mientras más biochar, pues el 20% para todos los tratamientos (álamo, agave y olote) tendió a ser menor respecto al resto. Los tratamientos de agave destacaron en cuanto al catión intercambiable de calcio, pues fueron el doble o hasta 10 veces mayor que algunos de los otros tratamientos de álamo y olote, y es similar a otro estudio (Lehmann, *et al.*, 2003); esto se puede deber a que el calcio

se encuentra disuelto como carbonato de calcio, por lo está más disponible para las plantas (Glaser *et al.*, 2002).

Tabla 10. Materia orgánica (MO), cationes intercambiables (CIN) de K, Na, Ca y Mg y Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC), del control (Suelo franco arenoso) y de la mezcla de suelo franco arenoso con biochar en diferentes proporciones.

Tratamiento	MO	CIN K	CIN Na	CIN Ca	CIN Mg	CIC	
Control	0.72	0.53±0.00 ^c	0.045±0.00 ^d	1.143±0.00 ^d	0.137±0.00 ^c	8.4	
Álamo	5% + SFA	1.87	0.54±0.00 ^c	0.063±0.00 ^c	1.183±0.00 ^c	0.134±0.00 ^d	9
	10%+SFA	1.56	0.72±0.00 ^a	0.075±0.00 ^a	1.216±0.00 ^b	0.139±0.00 ^b	8
	20%+SFA	1.27	0.59±0.00 ^b	0.066±0.00 ^b	1.351±0.00 ^a	0.144±0.00 ^a	9
Control	0.72	0.53±0.00 ^d	0.045±0.00 ^b	1.143±0.00 ^c	0.136±0.00 ^d	8.4	
Olote	5% + SFA	1.18	0.71±0.01 ^c	0.085±0.00 ^a	1.175±0.00 ^b	0.144±0.00 ^c	9
	10%+SFA	1.36	0.87±0.00 ^b	0.083±0.00 ^a	1.128±0.00 ^d	0.150±0.00 ^b	8
	20%+SFA	2.44	1.33±0.00 ^a	0.045±0.00 ^b	1.256±0.00 ^a	0.168±0.00 ^a	9.6
Control	0.72	0.53±0.00 ^b	0.045±0.00 ^c	1.143±0.00 ^d	0.137±0.00 ^c	8.4	
Agave	5% + SFA	1.59	0.57±0.00 ^a	0.103±0.00 ^b	2.503±0.03 ^c	0.162±0.00 ^b	9.8
	10%+SFA	1.92	0.58±0.01 ^a	0.172±0.00 ^a	5.340±0.04 ^b	0.187±0.00 ^a	8.8
	20%+SFA	1.95	0.42±0.01 ^c	0.044±0.00 ^d	11.262±0.08 ^a	0.138±0.00 ^c	9.6

5% álamo + 95% suelo (5% Álamo SFA), 10% álamo + 90% suelo (10% Álamo SFA), 20% álamo + 80% suelo (20% Álamo SFA), 5% agave + 95% suelo (5% Agave SFA), 10% Agave +90% suelo (10% Agave SFA), 20% Agave +80% suelo (20% Agave SFA), 5% Olote + 95% suelo (5% Olote SFA), 10% Olote +90% suelo (10% Olote SFA), 20% Olote +80% suelo (20% Olote SFA).

Tratamientos con la misma letra son estadísticamente iguales (P<0.05).

7.6.3. Agua disponible en la mezcla de suelo franco arenoso con biochar en diferentes proporciones

Numerosos estudios han evaluado y encontrado que el biochar incrementa la capacidad de retención de agua de los suelos (Glaser *et al.*, 2002; Dugan *et al.*, 2010; Laird *et al.*, 2010; Revell, 2011; Hale *et al.*, 2014), aunque también se han encontrado casos en los que no (Muter *et al.*, 2014; Brewer *et al.*, 2012), sin embargo, no se sabe que cantidad del agua está disponible para las plantas. Muy pocos estudios han evaluado el agua disponible del biochar para las plantas y su capacidad de mejorarla en los suelos (Dumroese *et al.*, 2011; Karer *et al.* 2013; Tammeorg *et al.*, 2014; Baronti *et al.*, 2014). Karer *et al.*, 2013, agregaron biochar de madera de haya 72 t ha⁻¹ a un suelo cambisol franco arcilloso y a un suelo

chernozem franco limoso, en el primero el biochar aumentó el agua disponible para las plantas un 22% mientras que en el segundo 42%. En el presente estudio, los biochar de álamo y de agave no incrementaron el agua disponible del suelo franco arenoso evaluado con respecto al control. Los únicos tratamientos que incrementaron el agua disponible fueron los de 10% olote y 20% agave quizá debido a una mayor cantidad de meso y macroporos (Downie et al., 2009; Major et al., 2009), sin embargo, estos aumento fueron muy ligeros de no más de 3% (Tabla 11).

7.6.4. Densidad aparente y real de la mezcla de suelo franco arenoso con biochar en diferentes proporciones

Debido a que la densidad del biochar es menor a la de los suelos minerales, su aplicación, también puede cambiar la densidad de los suelos con la posibilidad de incrementar la porosidad, aireación, la agregación con la materia orgánica y las arcillas así como tener efectos en la hidrología, en la biomasa de las raíces y la fauna del suelo, todo esencial para el buen crecimiento de la planta. (Laird, 2008; Joseph *et al.*, 2009; Major *et al.*, 2010; Laird *et al.*, 2010; Sparkes y Stoutdjesdijk, 2011; Bruun, 2011; Lehmann *et al.*, 2011; Hale *et al.*, 2014). Sin embargo, estos cambios van a depender precisamente de la porosidad y del tamaño de la partícula del biochar (Van Zwieten *et al.*, 2009; Bruun, 2011), pues si se incorporan partículas muy finas, éstas podrían potencialmente compactar y aumentar la densidad del suelo (Bruun, 2011). Laird *et al.*, 2010, agregaron biochar a un suelo arcilloso en proporciones de 5, 10 y 20 g kg⁻¹, estos suelos enmendados con biochar resultaron con densidades aparentes significativamente menores a los suelos no enmendados con biochar. Aunque en otros estudios, el biochar aplicado en proporciones de 0.5, 1, 2.5 y 5% en peso, no afectó la densidad aparente de un suelo franco limoso pero si disminuyó significativamente el de un suelo franco arenoso (Revell, 2011). En el presente estudio las aplicaciones en diferentes proporciones de biochar también disminuyeron la densidad aparente del suelo franco arenoso evaluado (Tabla 11), sin embargo, la densidad aparente disminuyó en las proporciones de 10% y 20% para los tres biochar aplicados, mientras que con el 5% no fue así, por lo que su efecto es inversamente proporcional. El biochar de agave con la proporción de 20% fue el que más disminuyó la densidad aparente del suelo, de 1.14 a 0.99 Mg m⁻³, es decir un 13% menos. La densidad real del suelo franco arenoso

(2.16 Mg m⁻³) fue disminuida en todas las proporciones de los biochar aplicados, a excepción del 5% olote (Tabla 8).

Tabla 11. Arena, arcilla, limo, textura (Franco arenoso), agua disponible (Agua Disp.), densidad aparente (Da) y densidad real (Dr) del control (Suelo franco arenoso) y de la mezcla de suelo franco arenoso con biochar en diferentes proporciones.

Tratamiento		Arena%	Arcilla%	Limo%	Textura	Agua Disp. %	Da g/ml	Dr g/ml
Control		59.28	16.9	23.82	Fa	15.34	1.14	2.16
Álamo	5% + SFA	61.28	14.22	24.5	Fa	14.04	1.20	2.10
	10%+SFA	60.56	15.16	24.28	Fa	14.50	1.08	2.07
	20%+SFA	61.06	16.16	22.78	Fa	14.79	1.06	2.12
Olote	5% + SFA	63.56	14.52	21.92	Fa	13.79	1.17	2.22
	10%+SFA	57.28	17.22	25.5	Fa	15.78	1.13	2.01
	20%+SFA	58.46	17.54	24.0	Fa	15.70	1.10	2.01
Agave	5% + SFA	60.56	15.3	24.14	Fa	14.55	1.21	2.13
	10%+SFA	61.56	15.3	23.14	Fa	14.39	1.14	2.12
	20%+SFA	61.56	15.3	23.14	Fa	14.21	0.99	2.10

5% álamo + 95% suelo (5% Álamo SFA), 10% álamo + 90% suelo (10% Álamo SFA), 20% álamo + 80% suelo (20% Álamo SFA), 5% agave + 95% suelo (5% Agave SFA), 10% Agave +90% suelo (10% Agave SFA), 20% Agave +80% suelo (20% Agave SFA), 5% Olote + 95% suelo (5% Olote SFA), 10% Olote +90% suelo (10% Olote SFA), 20% Olote +80% suelo (20% Olote SFA). Tratamientos con la misma letra son estadísticamente iguales (P<0.05).

7.6.5. Efecto de enmiendas de biochar en el desarrollo vegetativo de plántulas de pepino.

En muchos casos, se han registrado rendimientos en el crecimiento de las plantas con adiciones de fertilizante más el biochar en oposición a la adición de fertilizantes solamente (Yamato *et al.*, 2006; Asai *et al.*, 2009; Blackwell *et al.*, 2009; McElligott, 2011; Carter *et al.*, 2013). Se han encontrado más aumentos en experimentos en maceta que en campo, en suelos ácidos que en neutros y en suelos de textura arenosa que en suelos francos y limosos (Liu *et al.*, 2013). Este aparente incremento en la eficiencia del fertilizante con biochar se atribuye a la capacidad de retención de agua y por lo tanto los nutrientes que contiene ésta (Lehmann *et al.*, 2003; Chan y Xu 2009; McElligott, 2011). La variedad de efectos en el rendimiento de los cultivos parece depender de factores como la calidad del biochar, la cantidad biochar añadido, tipo de suelo y cultivo evaluado (Abenza, 2012). Van Zwieten *et al.* (2010), trabajaron con biochar de residuos de fábrica de papel con una tasa de 10 ton ha⁻¹ que mezclaron con dos suelos diferentes (calcarosol limoso y ferrosol) y que fueron incorporadas en macetas. Evaluaron la biomasa aérea con tres especies de plantas, rábano (*Raphanus sativus*), trigo (*Triticum aestivum*) y frijol de soya (*Sorghum bicolor*), y fertilizaron con N, P, K y Ca. Con el ferrosol hubo un gran incremento en la producción de la biomasa en los tres cultivos. El calcarosol emendado y con fertilizante en cambio, incrementó la biomasa del frijol de soya, pero redujo la biomasa del rábano y del trigo. Nigussie *et al.*, (2012), llevó a cabo un trabajo en macetas para investigar el efecto de la aplicación de biochar en suelos contaminados con cromo y la absorción y crecimiento de lechuga (*Lactuca sativa*) en suelos contaminados. El biochar producido del tallo del maíz fue aplicado a tasas de 0.5 y 10 Mgha⁻¹ en suelos artificialmente contaminados con cromo a niveles de 0, 10 y ppm. Los tejidos de las plantas fueron analizados en N, P y K. La absorción de nutrientes por la lechuga fue incrementada por la aplicación de biochar. El valor más alto de absorción de N fue observado con suelos con biochar de 10t/ha mientras que los valores más bajos fueron registrados en el control. La absorción de fósforo también fue significativamente alto, debido al alto contenido de P en el biochar y a las enmiendas del suelo con bochar. Rondon *et al.*, 2007, aplicaron biochar de eucalipto en tasas de 30, 60 y 90 g kg a un suelo oxisol arcilloso y evaluaron la biomasa del frijol común (*Phaseolus vulgaris*) en macetas. Antes de llenar las macetas se aplicó fertilizante equivalente a 300 kg

ha⁻¹ de cal, 20 kg ha⁻¹ de P y 20 kg ha⁻¹. Se utilizaron dos variedades, una con nódulos para la fijación de N y otra sin nódulos. La biomasa de la variedad con nódulos fue significativamente mayor en todas las aplicaciones de biochar en comparación con la variedad sin nódulos. Las adiciones de biochar incrementaron significativamente la biomasa de la planta mientras más proporción de biochar, la aplicación de 60 g kg⁻¹ incrementó hasta 39%, sin embargo, la aplicación de 90 g kg⁻¹ disminuyó la biomasa al nivel del control.

En el presente estudio, la aplicación de los biochar de olote y de agave más fertilizante a los suelos, causó un mayor crecimiento en la altura de las plantas de pepino mientras más proporción de biochar, sin embargo, los tratamientos de 10 y 20% de biochar de bagazo de agave fueron los únicos que causaron una diferencia estadística y que incrementaron un 21 y 26% con respecto al control (Tabla 12). Esta variable es importante, ya que se ha reportado que las plantas de bajo porte, por lo regular, presentan baja asimilación de carbohidratos y los frutos son de tamaño reducido (Trejo-Téllez *et al.*, 2003). El biochar de álamo solo incrementó la altura de las plantas cuando fue aplicado con 5%, sin embargo, no hubo una diferencia estadística con respecto al control con ninguna de las aplicaciones de este biochar. El peso seco de las hojas y tallos de las plantas de los tratamientos de agave fueron los únicos con mayor diferencia significativa respecto al control, 20% agave incrementó hasta un 35%, 10% agave incrementó 28% y 5% agave un 23% con respecto al control (Fig.6). La aplicación del biochar de 20% olote fue el único que indujo un mayor diámetro del tallo que el control (Tabla 12). Existen algunos trabajos que han evaluado la aplicación de biochar a diferentes suelos y sustratos, evaluando la altura y peso seco de tallos y hojas, el volumen y peso seco de las raíces y el número de hojas de la planta de pepino (Hale *et al.*, 2014; Jaiswal *et al.*, 2014 y Muter *et al.*, 2014). Jaiswal *et al.*, (2014) evaluaron plantas de pepino al aplicar a una mezcla para macetas, 0.5, 1 y 3% en peso biochar de viruta de madera de eucalipto y desechos de invernadero. El biochar de viruta de eucalipto aumentó la altura de las plantas mientras más proporción de biochar y en todas las proporciones causó una diferencia estadística con respecto a su control. El peso seco de las raíces de este estudio fue mayor en todos los tratamientos con biochar pero significativamente iguales con respecto al control, y a excepción del biochar de olote, a mayor proporción de biochar menos peso seco de raíces (Fig.7). Esa tendencia en la

disminución en el peso seco de las raíces podría ser causa de la disminución en la disponibilidad de agua de las mezcla de los sustratos, pues en los tratamientos de álamo y agave se tendió a disminuir el agua disponible, mientras que el biochar de olote mostró tendencias de aumentarla. El aumento en peso seco de raíz de los tratamientos de este estudio fue menor que el de Hale *et al* (2014) (59%), a excepción del tratamiento de 5% agave (66%). La longitud de la raíz en este estudio, tuvo una ligera tendencia a ser más larga mientras más proporción de biochar, sin embargo tampoco hubo una diferencia estadística con respecto al control (Tabla 12). El volumen de las raíces de los tratamientos de álamo y de olote de este estudio tendió a ser mayor a la del control sin ser significativamente diferentes, sin embargo, tendió a disminuir mientras más proporción de biochar (Fig. 8). En otros estudios con biochar se ha observado que la promoción del crecimiento exhibe a menudo una respuesta de dosis en forma de U inversa, efecto causado por un fenómeno denominado hormesis, en donde dosis bajas estimulan efectos positivos, pero altas dosis causan lo contrario y puede ser por compuestos orgánicos del biochar que pueden ser fitotóxicos a ciertos niveles (Jaiswal *et al.*, 2014; Muter *et al.*, 2014). Los volúmenes de las raíces de los tratamientos de 5% y 10% agave fueron 82 y 110% mayores, respectivamente comparadas al control (Fig.8). La baja densidad aparente, la disponibilidad de los nutrientes gracias a la CIC, el aumento del pH y la conductividad eléctrica gracias al biochar debieron haber contribuido al aumento en el peso y volumen de las raíces, principalmente en los tratamientos de agave. Los incrementos en la altura, en el peso seco de la parte aérea, de la raíz no fueron tan grandes comparados con los incrementos en la lechuga reportado por Carter *et al* (2013), sin embargo, hay diferencias significativas con respecto al control y con este estudio se prueba una vez más que el biochar mejora la eficiencia del fertilizante.

Tabla 12. Altura y diámetro de tallo; longitud, volumen y peso de raíz de plántulas de pepino; pH y conductividad eléctrica de lixiviados del 8 de abril de 2014.

Tratamiento		Altura de tallo (cm)	Diámetro de tallo	Longitud de raíz (cm)	pH de Lixiviados	C.E. de lixiviados
Control		45.8±3.95 ^a	7.83±0.57 ^a	27.5±2.38 ^a	5.9±0.15 ^a	0.21±0.02 ^a
Álamo	5%	49.8±1.08 ^a	7.57±0.53 ^a	29.57±0.30 ^a	6±0.23 ^a	0.25±0.01 ^a
	10%	41.2±1.39 ^a	6.98±0.26 ^a	24.4±1.21 ^a	5.9±0.18 ^a	0.30±0.02 ^a
	20%	41.9±1.51 ^a	7.10±0.11 ^a	29.4±1.44 ^a	5.7±0.20 ^a	0.28±0.04 ^a
Control		45.8±3.95 ^a	7.83±0.57 ^a	27.5±2.38 ^a	5.9±0.15 ^a	0.21±0.02 ^{bc}
Olote	5%	48.6±1.50 ^a	7.23±0.46 ^a	23.1±1.00 ^a	6.2±0.07 ^a	0.33±0.06 ^{ab}
	10%	49.2±1.93 ^a	6.66±0.23 ^a	28.2±1.02 ^a	6.0±0.10 ^a	0.13±0.02 ^c
	20%	53.2±3.08 ^a	8.07±0.17 ^a	29.9±1.92 ^a	6.2±0.12 ^a	0.35±0.04 ^a
Control		45.8±3.95 ^b	7.83±0.57 ^a	27.5±2.38 ^a	5.9±0.15 ^c	0.21±0.02 ^b
Agave	5%	53.1±2.46 ^{ab}	7.14±0.29 ^a	24.4±2.44 ^a	7.0±0.41 ^b	0.36±0.03 ^{ab}
	10%	55.5±1.52 ^a	7.24±0.26 ^a	27.6±1.95 ^a	7.9±0.06 ^a	0.53±0.06 ^a
	20%	57.5±2.89 ^a	7.30±0.16 ^a	29.7±0.95 ^a	8.0±0.03 ^a	0.52±0.11 ^a

Tratamientos con la misma letra son estadísticamente iguales (P<0.05).

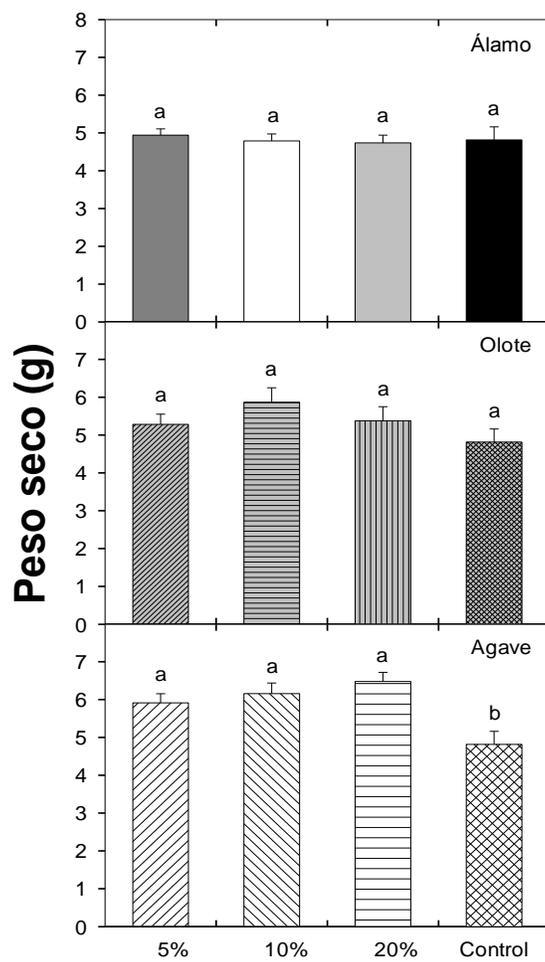


Fig. 6. Peso seco de tallos y hojas promedio de plántulas de pepino del 8 de abril de 2014.

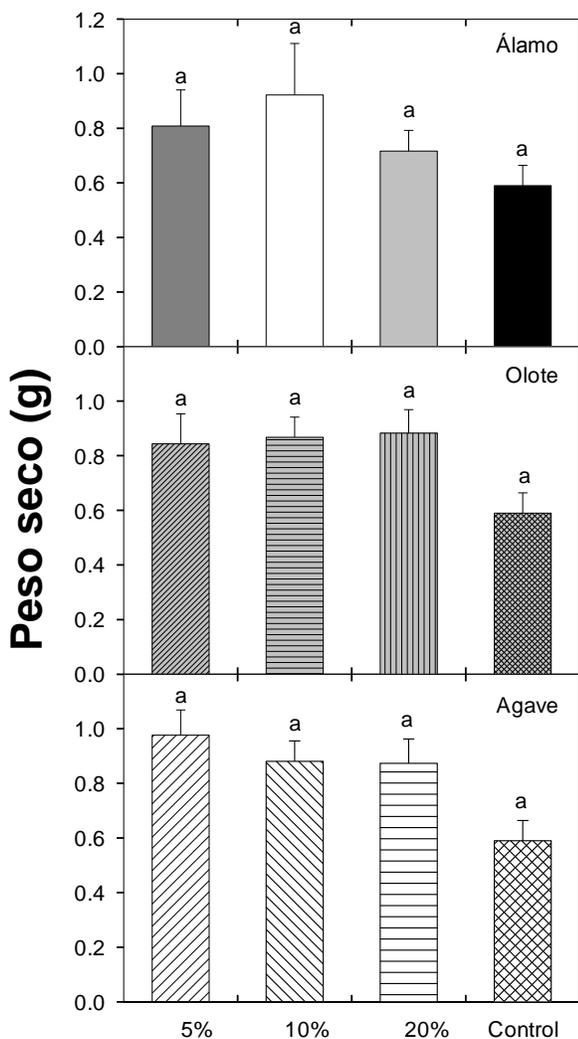


Fig. 7. Peso seco de raíces promedio de plántulas de pepino del 8 de abril de 2014.

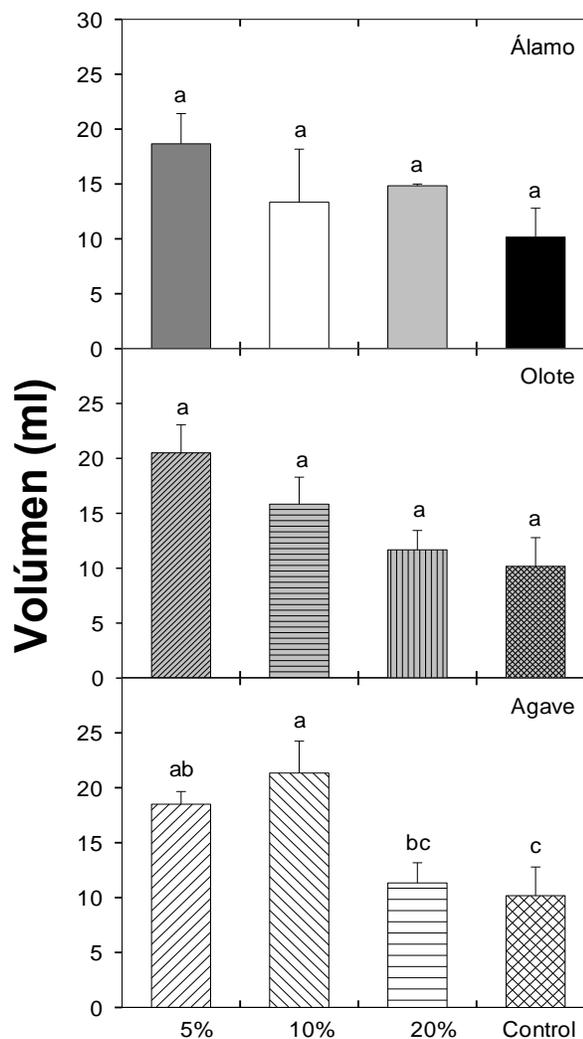


Fig. 8. Volumen de raíces promedio de plántulas de pepino del 8 de abril de 2014.

Tratamientos con la misma letra son estadísticamente iguales ($P < 0.05$).

7.6.6. pH y C.E. de lixiviados de enmiendas de biochar

A pesar de que se puede producir biochar con altos niveles de pH, no todos tienen un alto impacto en el pH del suelo, este efecto está relacionado con la capacidad del biochar de neutralizar la acidez (Sparkes y Stoutjesdijk, 2011). El biochar de bagazo de agave fue el

único que incrementó y mantuvo por 32 días el pH de los lixiviados del suelo más alcalino, pues causó una diferencia estadística con respecto al control. También fue el único en mantener un pH más alcalino (8) en los lixiviados como el que tenía como sustrato (8.8), pues a pesar de que el biochar de olote fue el que tuvo el pH más alto como sustrato (9.3), al mezclar con el suelo, no pudieron subir el pH de los lixiviados a más de 6.2 al igual que el biochar de álamo (8.3), lo cual se considera todavía moderadamente ácido según la NOM-021-SEMARNAT-2000. El bagazo de agave causó que se incrementara el pH de los lixiviados a un pH neutro de 7 en el tratamiento de 5% agave hasta un pH de 7.9 para el tratamiento de 10% agave y un pH de 8.0 para el de 20% agave (Tabla 12), que se consideran medianamente alcalinos. Ésta capacidad del biochar de agave de mantener un pH alcalino del suelo, es muy probable que sea debido a la cantidad de calcio o de carbonato de calcio que tiene, de acuerdo a los datos del análisis proximal.

Las plantas de pepino pueden crecer en un rango de pH de óptimo de 5.5 -7, y pueden soportar un pH de hasta 7.5 (<http://www.bionica.info/biblioteca/pepino%20guia%20tecnica.pdf>) sin embargo, de acuerdo al presente estudio, al parecer pueden crecer también de manera adecuada hasta en un pH de 8, pues fue en donde estas plantas tendieron a desarrollarse mejor. Las plantas en general crecen de manera adecuada con una conductividad eléctrica de 0.5 a 1.8 dS/m, arriba de 2 dS/m solo las plantas vigorosas se desarrollan bien, de 0.15 a 0.5 dS/m solo las plántulas que crecen en un medio alto en materia orgánica se desarrollan de manera adecuada y desde los 4 dS/m empieza a disminuir el rendimiento de la mayoría de las plantas (Bunt, 1976). La planta del pepino es moderadamente sensible a la salinidad (Sonneveld y Kreij, 1999; Villafañe, 2000), sin embargo, los valores de conductividad eléctrica de los lixiviados de las mezclas de suelo con biochar resultaron de 0.13- 0.52 dS/m (Tabla 12), lo que no causó toxicidad siendo en los tratamientos de 10% y 20% agave donde más se desarrollaron las plantas y en donde el valor de conductividad eléctrica fue arriba de 0.52 dS/m. El aumento de la materia orgánica por parte del biochar pudo haber contribuido también al desarrollo de las plantas en estas bajas conductividades.

7.6.7. Determinación de clorofilas en unidades SPAD

Las unidades SPAD en los tratamientos de álamo fueron menores que el control, mientras

más proporción de biochar, por lo que el tratamiento de 20% álamo fue 21% menor con respecto al control (Fig. 9). Esto estuvo relacionado con una disminución en la altura y en el volumen de las raíces de los tratamientos de 10% y 20% álamo. Aunque no hay una diferencia entre los tratamientos de olote y agave con respecto al control, el SPAD es menor en todos los tratamientos, se puede inferir la trasportación de fotosintatos a nuevas hojas, flores y frutos y por lo tanto, el desarrollo de las plantas en esos tratamientos.

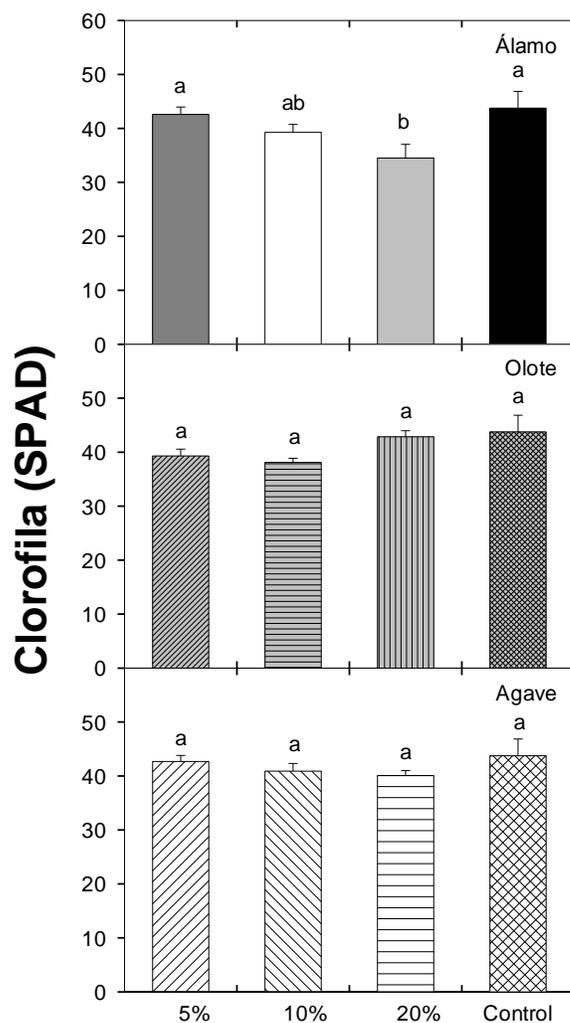


Fig. 9. Clorofila (SPAD) promedio de plántulas de pepino del 7 de abril de 2014.

Tratamientos con la misma letra son estadísticamente iguales ($P < 0.05$).

7.6.8. Nutrientes en hojas y tallos de pepino (Enmiendas de biochar)

El cultivo de pepino demanda cantidades específicas de nutrientes según la etapa de desarrollo en que se encuentra. El nutriente que más extrae la planta es el K, seguido del N, Ca y P. La mayoría de nutrientes son absorbidos en mayor cantidad durante la fructificación y la maduración (Aguilar, 2011). Los macronutrientes K, Na, Ca y Mg en las hojas de los tratamientos de álamo fueron menores que el control. Sin embargo, en cuanto al K, el control y el tratamiento de 20% álamo, fueron los únicos que resultaron dentro del rango de suficiencia nutrimental. En cambio en cuanto al Mg, todos los tratamientos estuvieron por debajo del rango óptimo. Los nutrientes de K y Na en los tratamientos de olote no mostraron una relación directa con el biochar pues los resultados entre los tratamientos fueron muy variables. El K en todos los tratamientos incluyendo el control estuvo dentro del rango de suficiencia nutrimental aunque fue alto el rango de Na. El Ca y el Mg fueron significativamente menores con respecto al control, pero particular el Ca estuvo por debajo del rango de suficiencia nutrimental del Ca, mientras que el Mg todos los tratamientos estuvo por arriba del rango. En los tratamientos de agave, el Na y el K fueron menores que el control pero estuvieron dentro del rango de suficiencia nutrimental. Al contrario Ca y Mg en los tratamientos de agave fueron mayores que el control, y todos los tratamientos estuvieron dentro del rango de suficiencia nutrimental, en cambio con el nutriente Mg, solo 5% y 20% agave estuvieron dentro del rango de suficiencia nutrimental. El P tendió a aumentar mientras más biochar en todos los tratamientos de agave, olote y álamo, y fueron mayores que el control. En cuanto al N, en los tratamientos de olote y agave tendió a aumentar y en los de álamo a disminuir mientras más proporción de biochar (Tabla 13).

Tabla 13. Macronutrientes de hojas de pepino del 8 de abril de 2014.

Tratamiento		K (ppm)	Na (ppm)	Ca (ppm)	Mg (ppm)	P (ppm)	N (ppm)
Control		53271±166.22 ^a	5101±2.02 ^a	13379±43.73 ^a	2753±1.97 ^a	11541±37.13 ^c	39583
Álamo	5%	32509±196.43 ^c	4563±15.8 ^b	10475±28.25 ^c	2318±1.80 ^b	17536±153.6 ^b	39760
	10%	32709±219.13 ^c	3466±8.30 ^c	11703±103.5 ^b	2181±1.20 ^d	17367±52.11 ^b	33040
	20%	46603±81.61 ^b	2978±5.41 ^d	11810±147.4 ^b	2197±6.12 ^c	22298±117.04 ^a	39667
Control		53271±166.2 ^b	5101±2.02 ^b	13379±43.73 ^a	2753±1.97 ^a	11541±37.13 ^d	39583
Olote	5%	37687±43.62 ^d	5683±2.20 ^a	8967±20.15 ^c	2167±4.18 ^c	13372±92.38 ^c	32286
	10%	52795±165.41 ^c	3447±3.62 ^d	10358±37.36 ^b	2301±3.52 ^b	18209±161.5 ^b	32577
	20%	53740±156.49 ^a	4060±9.99 ^c	9919±13.31 ^b	1846±8.68 ^d	31582±809.33 ^a	35000
Control		53271±166.22 ^a	5101±2.02 ^a	13379±43.73 ^c	2753±1.97 ^c	11541±37.13 ^c	39583
Agave	5%	41185±43.15 ^b	2774±3.20 ^c	25846±119.7 ^b	3273±5.68 ^a	21253±292.86 ^a	31769
	10%	34599±186.9 ^d	2960±10.0 ^b	12872±209.6 ^d	2874±1.20 ^b	17874±124.2 ^b	32577
	20%	39608±39.71 ^c	2055±3.12 ^d	37083±101.5 ^a	3271±2.07 ^a	21195±242.33 ^a	32480

Tratamientos con la misma letra son estadísticamente iguales (P<0.05).

Por otro lado, en cuanto a los micronutrientes, el Cu varió mucho entre los tratamientos con biochar. Solo el control, los tratamientos 20% álamo, 10% olote, 5% y 20% agave estuvieron dentro del rango de buen abastecimiento de nutrientes, los demás tratamientos se mostraron por debajo del rango. El Mn tendió a disminuir en todos los tratamientos de agave, álamo y olote con respecto al control, excepto el tratamiento de 5% olote que fue significativamente mayor que el control. El Zn fue menor en los tratamientos de álamo y de olote con respecto al control, pero al contrario en los tratamientos de agave fue mayor que todos los tratamientos incluyendo al control. El Fe fue menor en todos los tratamientos de de agave, álamo y olote con respecto al control, sin embargo, todos los tratamientos estuvieron dentro del rango abastecimiento nutrimental a excepción del tratamiento del control y el 20% olote que estuvo ligeramente por arriba (Tabla 14).

Tabla 14. Micronutrientes de hojas de pepino del 8 de abril de 2014.

Tratamiento		Cu (ppm)	Mn (ppm)	Zn (ppm)	Fe (ppm)
Control		7.28±0.08 ^b	255.17±0.53 ^a	89.68±0.18 ^a	432.11±0.66 ^a
Álamo	5%	0.90±0.10 ^d	209.46±0.18 ^c	59.97±0.23 ^d	268.00±1.54 ^c
	10%	4.41±0.00 ^c	240.66±0.70 ^b	78.66±0.53 ^c	291.10±1.31 ^b
	20%	10.97±0.05 ^a	190.31±0.37 ^d	86.00±0.09 ^b	264.06±0.41 ^d
Control		7.28±0.08 ^b	255.17±0.53 ^b	89.68±0.18 ^a	432.11±0.66 ^a
Olote	5%	0.27±0.07 ^d	288.58±1.53 ^a	55.98±3.27 ^d	219.63±2.55 ^d
	10%	8.56±0.06 ^a	237.20±0.55 ^c	73.36±0.18 ^b	259.74±0.31 ^c
	20%	4.31±0.06 ^c	179.62±0.29 ^d	64.14±1.42 ^c	306.04±0.64 ^b
Control		7.28±0.08 ^c	255.17±0.53 ^a	89.68±0.18 ^b	432.11±0.66 ^a
Agave	5%	11.76±0.11 ^a	69.42±0.07 ^b	67.41±0.11 ^c	295.57±0.65 ^b
	10%	2.12±0.07 ^d	41.84±0.35 ^c	37.02±0.12 ^d	235.42±0.98 ^d
	20%	9.20±0.22 ^b	32.88±0.21 ^d	112.38±0.08 ^a	281.98±1.08 ^c

Tratamientos con la misma letra son estadísticamente iguales (P<0.05).

10. CONCLUSIONES

- Los tres residuos agroindustriales de álamo, olote y agave, presentaron una cantidad similar de celulosa y hemicelulosas. El bagazo de agave predominó en el contenido de extraíbles y cenizas, y fue el sustrato con la menor cantidad de lignina, mientras que el álamo, como madera dura sobresalió con mayor contenido de ésta.
- El biochar de álamo, por originarse de una madera, presentó una alta cantidad de carbono fijado, el cual es un indicador en un sustrato para capturar carbono y característica importante en el biochar, pero se vinculó con una alta relación C/N que inhibió el desarrollo de las plantas. En el sustrato de biochar de bagazo de agave se registró una menor cantidad de carbono fijado y relación C/N, pero tuvo un mayor efecto en el desarrollo de las plantas.
- El biochar de bagazo de agave y de olote fueron efectivos como aditivo, para mejorar el sustrato de peatmoss y el desarrollo de las plantas de pepino, pues incrementaron significativamente la disponibilidad de los nutrientes y por tanto los macronutrientes en las hojas y tallos; el peso seco de hojas y tallos y de raíz, así como la altura y el diámetro del tallo y el volumen de la raíz, con excepción del olote que solo aumentó la longitud de la raíz. Además el biochar de agave incrementó el pH, creando un pH más cercano al óptimo para las plantas de pepino.
- El biochar como una enmienda para el suelo franco arenoso, tuvo un efecto significativo en la mejora de las características del suelo y en el desarrollo de la planta del pepino (*Cucumis sativus* L. Var. SMR-58).
- Las enmiendas de biochar de agave comparadas con las de olote, álamo y el control, tuvieron un efecto significativo en el desarrollo de las plantas de pepino, particularmente en la altura del tallo y el volumen de las raíces. En el caso de peso seco en hojas, tallos y en raíces aunque no mostraron diferencias significativas, se observó una tendencia a tener altos valores con los biochar de agave. Estos

parámetros se presentaron con un mayor vigor de la planta, mostrando su efectividad como enmienda.

- El análisis nutrimental en hojas y tallos mostró variación en todos los tratamientos, y a pesar de que la tendencia en el control fue tener mayor cantidad de macronutrientes y micronutrientes, las plantas con las enmiendas de biochar tuvieron un mayor desarrollo, lo que se relacionó con una disminución de las unidades SPAD en las hojas de los tratamientos con biochar, que demuestra la mayor disponibilidad de los nutrientes del fertilizante por parte del biochar.
- Se demostró que el biochar de bagazo de agave fue la mejor enmienda para mejorar las características del suelo y para el desarrollo de la planta de pepino.

12. REFERENCIAS

- Abenza D. 2012. Tesis de licenciatura: Evaluación de efectos de varios tipos de biochar en suelo y planta. Universidad Autónoma de Barcelona y CREAM. 111 p.
- Aguilar R.M.C. 2011. Tesis de maestría. Identificación de la deficiencia de magnesio en pepino mediante espectroradiometría. Colegio de postgraduados. Instituto de enseñanza e investigación en ciencias agrícolas. 70 p.
- Alcántar G.G y Trejo-Tellez L-I. Nutrición de cultivos. 2009. Editado por el Colegio de Posgraduados y Mundi-Prensa. México, D. F. 454 p.
- 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.
- Antal M.J.Jr., Grønli M. 2003. The Art, Science, and Technology of Charcoal Production. Ind. Eng. Chem. Res., 42 (8): 1619-1640.
- Ansorena M.J. 1994. Sustratos. Propiedades y caracterización. Ediciones Mundi-Prensa. España. 172 p.
- Asai H., Samson B.K., Stephan H.M., Songyikhangsuthor K., Homma K., Kiyono Y., Inoue Y., Shiraiwa T., and Horie T. 2009. Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos: 1. Soil physical properties, leaf SPAD and grain yield. Field Crops Research. 111:81-84.
- ASTM. 2007. Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal ASTM D1762-84, ASTM International, West Conshohocken, PA. www.astm.org
- Ballesteros A.C. 1989. Tesis de maestría: Degradación actual y potencial de los suelos de Zapopan, Jalisco. Universidad de Guadalajara. 95 p.
- Baronti S., Vaccari F.P., Miglietta F., Calzolari C., Lugato E., Orlandini S., Pini R., Zulian C., Genesio L. 2014. Impact of biochar application on plant water relations in *Vitis vinifera* (L.) .Europ. J. Agronomy 53:38–44.
- Blackwell P., Reithmuller G., Collins M. 2009. Biochar application to soil. En: Biochar for Environmental Management. Lehmann J. and Joseph S. Earthscan Publishing for a sustainable future: UK y USA. 207-226p.
- Bolaños- Herrera A. 1998. Introducción a la olericultura. 1ed. San José, C.R. EUNED. 257 p.
- Bouyoucos, G.S. 1936. Directions for making mechanical analysis of soil by hydrometer method. Soil Science. 4: 225-228.

- Brewer C.E., Rohr K., Satrio J.A., and Brown R.C. 2009. Characterization of Biochar from Fast Pyrolysis and Gasification Systems. *Environmental Progress & Sustainable Energy* 28(3):386-396.
- Brewer C.E., Hu Yan-Yan, Schmidt-Rohr K., Loynachan T.E., Laird D.A., y Brown R.C. 2012. Extent of Pyrolysis Impacts on Fast Pyrolysis Biochar Properties. *Journal of environmental quality*. 41:1115-1122.
- Brewer C.E., Chuang V.J., Masiello C.A. Gonnermann H., Gao X., Dugan B., Driver L.E., Panzacchi P., Zygourakis K., Davies C.A. 2014. New approaches to measuring biochar density and porosity. *Biomass and bioenergy* 66:176-185.
- Brown R. 2009. Biochar Production Technology. 127-146. En: *Biochar for Environmental Management*. Lehmann J. and Joseph S. Earthscan Publishing for a sustainable future: UK y USA. 416 p.
- Brownsort P. 2009. Tesis de maestría: Biomass pyrolysis processes: performance parameters and their influence on biochar system benefits. University of Edinburgh. 84 p.
- Bruun E.W. 2011. Tesis de doctorado: Application of Fast Pyrolysis Biochar to a Loamy soil - Effects on carbon and nitrogen dynamics and potential for carbon sequestration. Information Service Department. Risø DTU. National Laboratory for Sustainable Energy. Technical University of Denmark. 109 p.
- Bruun S. y EL-Zehery T. 2012. Biochar effect on the mineralization of soil organic matter. *Pesq. agropec. bras* 47 (5): 665-671.
- Bunt, A. C. 1976. Media and mixes for container-grow plants. Unwin Hyman Ltd London. 309 p.
- Byrne C.E. y Nagle D. C. 1997. Carbonized Wood monoliths-Carbonization. *Carbon* 35 (2): 267-273.
- Carrier M., Joubert J.E., Danje S., Hugo T., Görgens J., Knoetze J.H. 2013. Impact of the lignocellulosic material on fast pyrolysis yields and product quality. *Bioresource Technology* 150:129–138.
- Carter S., Shackley S., Sohi S., Suy T B., y Haeefe S. 2013. The Impact of Biochar Application on Soil Properties and Plant Growth of Pot Grown Lettuce (*Lactuca sativa*) and Cabbage (*Brassica chinensis*). *Agronomy* 3: 404-418.
- Chan K. Y., Van Zwieten L., Meszaros I., Downie A., Joseph S. 2007. Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment. *Australian Journal of Soil Research* 45:629-634.

- Chan K.Y. y Xu Z. 2009. Biochar: Nutrient properties and their enhancement en: Biochar for Environmental Management. Lehmann J. and Joseph S. Earthscan Publishing for a sustainable future: UK y USA. 207-226 p.
- Cheng C.H., Lehmann J., Thies J.E., Burton S.D., Engelhard M.H. 2006. Oxidation of black carbon by biotic and abiotic processes. *Organic Geochemistry* 37:1477–1488.
- Cheng C-H., Lehmann J., Engelhard H.M. 2008. Natural oxidation of black carbon in soils: Changes in molecular form and surface charge along a climosequence. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 72:1598–1610.
- Chidumayo E.N. 1994. Effects of wood carbonization on soil and initial development of seedlings in miombo woodland, Zambia. *For. Ecol. Manage.* 70: 353–357.
- Colla G., Rouphael Y., Rea E., Cardarelli M. 2012. Grafting cucumber plants enhance tolerance to sodium chloride and sulfate salinization. *Scientia Horticulturae* 135: 177–185.
- Collison C.M., Collison C.L., Sakrabani R., Tofield B., Wallage Z. 2009. Biochar and Carbon Sequestration: A Regional Perspective. A report prepared for East of England Development Agency (EEDA). Low Carbon Innovation Centre. University of East Anglia. 109 p.
- Comisión Veracruzana de Comercialización Agropecuaria, Gobierno del Estado de Jalisco. 2010. Monografía del Pepino en: <http://portal.veracruz.gob.mx/pls/portal/docs/PAGE/COVECAINICIO/IMAGENES/ARCHIVOSPDF/ARCHIVOSDIFUSION/MONOGRAFIA%20PEPINO2010.PDF>
- Córdoba J.A., Salcedo E., Rodríguez R., Juan Francisco Zamora J.F., Manríquez R., Contreras H., Robledo J., Delgado E. 2013. Caracterización y valoración química del olote: degradación hidrotérmica bajo condiciones subcríticas. *Revista latinoamericana de química.* 41(3).
- Crespí S.N., Pérez M., Cuesta J. M. , Cabrera J.A. , García A., Millán R. 2007. Procesos de degradación del suelo. Gobierno de España. Ministerio de Educación y Ciencia. Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales, y Tecnológicas. 88 p.
- Crespo–González M.R, González–Eguiarte D-R., Rodríguez-Macías R., Luis Rendón-Salcido A., Del Real–Laborde J.I. y Torres–Morán J.P. 2013. Evaluación de la composta de bagazo de agave como componente de sustratos para producir plántulas de agave azul tequilero. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 4 (8): 1161-1173.
- Dave´s garden. <http://davesgarden.com/guides/pf/go/7009/#b> Consulta: 3/Febrero/2015
- De Boodt M., Verdonck O. 1972. The physical properties of the substrates in horticulture. *Acta Hort* 26:37-44.

- Demirbas, A. 2004. Effects of temperature and particle size on bio-char yield from pyrolysis of agricultural residues. *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 72:243-248.
- Denevan W., Wood W. 2004. Discovery and awareness of anthropogenic Amazonian dark earths (Terra Preta) en: *Energy and Agricultural Carbon Utilization: Sustainable Alternatives to Sequestration*. University of Georgia, Athens, GA (USA), June 10-11. (<http://www.eprida.com/eacu/PDF%20Files/BDenevan.pdf>) Consulta: 1/ Dic/2013
- Downie A., Crosky A. Munroe P. 2009. Physical properties of biochar. En *Biochar for environmental management: science and technology* Eds. Lehmann J. and Joseph S. Earthscan, London ; Sterling, VA, 13-32 p.
- Dugan E., Verhoe A., Robinson S. y Sohi S. 2010. Bio-char from sawdust, maize stover and charcoal: Impact on water holding capacities (WHC) of three soils from Ghana. 2010 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World 1 – 6 August 2010, Brisbane, Australia.
- Dumroese R.K., Heiskanen J., Englund K., Tervahauta A. 2011. Pelleted biochar: Chemical and physical properties show potential use as a substrate in container nurseries. *Biomass and Bioenergy* 35: 2018-2027.
- Eden Brothers. “The sediest place on earth”. Cucumber seeds (Pickling)- “SMR58”. http://www.edenbrothers.com/store/cucumber_seeds_smr58.html Consulta: 3/Febrero/2015
- Escalante-Rebolledo M.A. 2013. Tesis de doctorado. Biocarbonos (Biochars), caracterización y efecto en la biocmasa y nutrición de N P K en una gramínea. Colegio de postgraduados. Instituto de enseñanza e investigación en ciencias agrícolas. 137 p.
- Espino E., Cakir M., Domenek S., Román-Gutiérrez A.D., Belgacem N., Bras J. 2014. Isolation and characterization of cellulose nanocrystals from industrial by-products of Agave tequilana and barley. *Industrial Crops and Products* 62: 552–559.
- Fahmi R., Bridgwater A.V., Darvell L.I., Jones J.M., Yates N., Thain S., Donnison I.S. 2007. The effect of alkali metals on combustion and pyrolysis of Lolium and Festuca grasses, switchgrass and willow. *Fuel* 86:1560–1569.
- Fahmi R., Bridgwater A.V., Donnison I., Yates N., Jones J.M. 2008. The effect of lignin and inorganic species in biomass on pyrolysis oil yields, quality and stability. *Fuel* 87: 1230–1240.
- FAO. 1983. Simple technologies for making charcoal. FAO. Italy.
- FAO. 2003. Agricultura orgánica, ambiente y seguridad alimentaria. Environment and Natural Resources Management Series. 262 p. <http://www.fao.org/docrep/005/y4137s/y4137s00.htm> 1/Dic/2013.

- FAO. (<http://www.fao.org/soils-portal/degradacion-del-suelo/es/>), Consulta: 2 /mayo/ 2014
- Financiera Rural. 2008. La producción de hortalizas en México. 47 p.
- FAO. 2012. Hacia el futuro que queremos. Erradicación del hambre y transición a sistemas agrícolas y alimentarios sostenibles. Italia. 32 p.
- FUMIAF. 2005. Cultivo de pepino europeo en invernaderos de alta tecnología en México. Fundación Mexicana para la Investigación Agropecuaria y Forestal, A.C. Sagarpa, México. 37 p.
- García K.A. y Angulo L.K. 2008. Tesis: Efecto de cultivos en asocio pepino (*cucumis sativus* L.), pipian (*cucúrbita pepo* L.) y frijol de vara (*vigna unguiculata* L. walp), en la ocurrencia poblacional de insectos plagas, benéficos y el rendimiento en tisma, masaya. Universidad Nacional Agraria. 91 p.
- Garrote G., Elena Falqué E., Domínguez H., Parajó J.C. 2007. Autohydrolysis of agricultural residues: Study of reaction byproducts. *Bioresource Technology* 98:1951-1957.
- Gaskin J.W., Speir A., Morris L.M., Ogden L., Harris K., Lee D. y Das K.C. 2007. Potential for pyrolysis char to affect soil moisture and nutrient status of a loamy sand soil. *Proceedings of the 2007 Georgia Water Resources Conference, held March 27–29, at the University of Georgia.*
- 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.
- Gaskin J.W., Speir R.A., Harris K., Das K.C., Lee R.D., Morris L.A., Fisher D.S. 2010. Effect of peanut hull and pine chip biochar on soil nutrients, corn nutrient status, and yield. *Agron J* 102:623–633
- Gaunt J. y Cowie A. 2009. Biochar, Greenhouse Gas Accounting and Emissions Trading. En: *Biochar for Environmental Management*. Lehmann J. and Joseph S. Earthscan Publishing for a sustainable future: UK y USA. 317-340 p.
- Gaunt J. y Driver K. 2010. Bringing Biochar Projects into the Carbon Marketplace. An introduction to biochar science, feedstocks and technology. 24 p.
- Glaser B., Lehmann J., Zech W. 2002. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal - a review. *Biology and Fertility of Soils*. 35:219-230.
- Guereña D., Lehmann J., Hanley K., Enders A., Hyland C y Susana R. 2012. Nitrogen dynamics following field application of biochar in a temperate North American maize-based production system. *Plant soil*. 365: 239-254.

- Guía técnica del cultivo del pepino: <http://www.bio-nica.info/biblioteca/pepino%20guia%20tecnica.pdf> Consulta: 9/Mayo/2015
- Gunter-Brauch H. y Oswald-Spring U. 2009. Securitizing the ground, grounding security. Desertification land degradation and drought. UNCCD issue paper No.2. Secretariat of the United Nations Convention to Combat Desertification. Germany. 41 p.
- Hale L., Luth M., Kenney R., Crowley D. 2014. Evaluation of pinewood biochar as a carrier of bacterial strain *Enterobacter cloacae* UW5 for soil inoculation. *Applied Soil Ecology* 84:192–199.
- Henreaux J. 2012. Tesis de maestría: Efecto del biocarbón combinado con fertilizantes orgánicos y microorganismos benéficos sobre el desarrollo, productividad y resistencia de las plantas, turrialba, costa rica. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza Escuela de Posgrado. 99p.
- Hernández, G. 2006. Manejo del pepino en invernadero En: Diplomado Internacional en Agricultura Protegida. Módulo 5. Cd. Obregón, Sonora, México. 49 p.
- Hon D.N.S y Shiraishi N. 2001. *Wood and Cellulosic Chemistry*, Second Edition, revised and expanded, CRC Press, USA, 928 p.
- Hornedo E. 1957. Trabajos Principales Presentados en el Congreso para Detener el Avance de la Erosión de la Tierra en México; Celebrado en la Cd de México del 17 al 20 de Diciembre. Editorial Periodística e Impresora de Mexico, DF. 160 p.
- Hoshi T. 2001. Growth promotion of tea trees by putting bamboo charcoal in soil. <http://www.hoshi-lab.info/cha/paper.pdf>
- Huerta R. Propiedades físicas y químicas de los suelos. Manual de laboratorio. 1982. México. Universidad de Guadalajara. 193 p.
- Íñiguez G., Martínez G., Flores P.A., Virgen G. 2011. Utilización de subproductos de la industria tequilera. parte 9. Monitoreo de la evolución del compostaje de dos fuentes distintas de bagazo de agave para la obtención de un substrato para jitomate. *Rev. Int. Contam. Ambie.* 27 (1): 47-59.
- Ioannidou O., Zabaniotou A., Antonakou E.V., Papazisi K.M., Lappas A.A., Athanassiou C. 2009. Investigating the potential for energy, fuel, materials and chemicals production from corn residues (cobs and stalks) by non-catalytic and catalytic pyrolysis in two reactor configurations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13:750–762.
- Ippolito J. A., Stromberger M. E., Lentz R. D. and Dungan R. S. 2014. Hardwood Biochar Influences Calcareous Soil Physicochemical and Microbiological Status. *Journal of environmental quality.* 43:681–689.

- Jaime-Green, M., Lucero-Flores, J.M, Sánchez- Verdugo, C. 2012. Innovación tecnológica de sistemas de producción y comercialización de especies aromáticas y cultivos élite en agricultura orgánica protegida con energías alternativas de bajo costo. Inteligencia de mercado de pepino. Edit. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. La Paz, Baja California Sur, México. 85 p.
- Jaiswal A.K., Elad Y., Graber E.R. y Frenkel O. 2014. Rhizoctonia solani suppression and plant growth promotion in cucumber as affected by biochar pyrolysis temperature, feedstock and concentration. *Soil Biology & Biochemistry* 69: 110-118.
- Joseph S., Cordner Peacocke C., Lehmann J. y Munroe P. 2009. Developing a Biochar Classification and Test Methods. En: *Biochar for Environmental Management*. Lehmann J. and Joseph S. Earthscan Publishing for a sustainable future: UK y USA. 107-126 p.
- Kaliyan N, Morey R.V. 2010. Densification characteristics of corn cobs. *Fuel Processing Technology* 91 (5): 559–565.
- Karer J., Wimmer B., Zehetner F., Kloss S. y Soja G. 2013. Biochar application to temperate soils: effects on nutrient uptake and crop yield under field conditions. *Agricultural and food science* 22: 390–403.
- Kestur G. S., Flores-Sahagun T.H.S., Dos Santos L.P., Dos Santos J., Mazzaro I., Mikowski A. Characterization of blue agave bagasse fibers of Mexico. 2013. *Composites: Part A* 45:153–161.
- Kim K.H. , Eom I.Y., Lee S.M., Choi D., Yeo H., Choi I.G., Choi. J. W. 2011. Investigation of physicochemical properties of biooils produced from yellow poplar wood (*Liriodendron tulipifera*) at various temperatures and residence times. *Journal of Analytical and applied pyrolysis*. 92 (1):2–9.
- Kim H.Y., Gwak S.S., Su-Yeon Lee, Jeong H.S., Ryu K.O., Choi G.I. 2012. Biomass characteristics and ethanol production of yellow poplar (*Liriodendron tulipifera*) treated with slurry composting and biofiltration liquid as fertilizer. *Biomass and bioenergy* 42:10-17.
- Kim Y.H., Lee S.M., Lee H.W., Lee J.W. 2012. Physical and chemical characteristics of products from the torrefaction of yellow poplar (*Liriodendron tulipifera*). *Bioresource Technology* 116:120–125.
- Kimetu J.M., Lehmann J., Ngoze S.O., DaMugendi D.N., Kinyangi J.M., Riha S., Verchot L., Recha J.W., y Pell A.N. 2008. Reversibility of Soil Productivity Decline with Organic Matter of Differing Quality Along a Degradation Gradient. *Ecosystems* 11: 726–739.

- Koo, B.W., Park, N., Jeong, H.S., Choi, J.W., Yeo, H., Choi, I. G. 2011. Characterization of by-products from organosolv pretreatments of yellow poplar wood (*Liriodendron tulipifera*) in the presence of acid and alkali catalysts, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 17:18–24.
- Laboratorios A-L de México, S.A. de C.V. 2011. Análisis Foliares. <http://www.agroanalisis.com.mx/descargas/intro/analisis-foliar.pdf>
- Laird D.A. 2008. The charcoal vision: A win–win–win scenario for simultaneously producing bioenergy, permanently sequestering carbon, while improving soil and water quality. *Agronomy journal* 100 (1): 178-181.
- Laird D.A., Fleming P., Davis D.D., Horton R., Wang B., Karlen D.L. 2010. Impact of biochar amendments on the quality of a typical Midwestern agricultural soil. *Geoderma* 158:443–449.
- Lal R. y Augustin B. 2012. *Carbon Sequestration in urban Ecosystems*. Springer. USA. 385 p.
- Lehmann J., da Silva Jr J.P., Rondon M., Cravo M.S., Greenwood J., Nehls T., Steiner C., y Glaser B. 2002. ‘Slash-and-char – a feasible alternative for soil fertility management in the central Amazon?’, *Proceedings of the 17th World Congress of Soil Science, Bangkok, Thailand*. CD–ROM Paper no. 449. 1-12 p.
- Lehmann J., Pereira J., Steiner C., Nehls T., Zech W. y Glaser B. 2003. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments. *Plant and Soil* 249: 343–357.
- Lehmann J. y Rondon M. 2006. Bio-char soil management on highly weathered soils in the humid tropics. *Biological Approaches to Sustainable Soil Systems*: 517-530.
- Lehmann J. 2007. Bio-energy in the black. *Front Ecol Environ* 5(7): 381–387.
- Lehmann J. y Joseph S. 2009. *Biochar for Environmental Management: An Introduction* En: *Biochar for Environmental Management*. Lehmann J. and Joseph S. Earthscan Publishing for a sustainable future: UK y USA. 1-12 p.
- Lehmann J., Rillig M.C., Thies J., Masiello C.A., Hockaday W.C., Crowley D. 2011. Biochar effects on soil biota - A review. *Soil Biology & Biochemistry* 43:1812-1836.
- Liang B., Lehmann J., Solomon D., Kinyangi J., Grossman J., O’Neill B., Skjemstad J.O., J. Thies, Luizã o F. J., Petersen J., y Neves E.G. 2006. Black Carbon Increases Cation Exchange Capacity in Soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 70:1719-1730.

- Liu X., Zhang A., Ji C., Joseph S., Bian R., Li L., Pan G. y Paz-Ferreiro J. 2013. Biochar's effect on crop productivity and the dependence on experimental conditions-a meta-analysis of literature data. *Plant Soil*. 373:583–594.
- López-Elías J., Rodríguez J.C., Huez- L. M.A., Garza O. S., Jiménez- L.J., Edgar I. Leyva E.E.I. 2011. Producción y calidad de pepino (*Cucumis sativus* L.) bajo condiciones de invernadero usando dos sistemas de poda. Production and quality of cucumber (*Cucumis sativus* L.) under greenhouse conditions using two pruning systems. *IDESIA (Chile)*. 29:21-27.
- Maia MBF., Madary B.E., Novotny E H. 2011. Advances in Biochar Research in Brazil. *Dynamic Soil, Dynamic Plant*. Global science books. 5 (Special Issue 1): 53-58.
- Major J. 2006. El Biocarbón: Una herramienta para el manejo sostenible de suelos y la producción de energía. *Nota técnica. Tecnicaña*. 18 (10): 20-24.
- Major J., Rondon M., Molina D., Riha S.J., Lehmann J. 2010. Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian oxisol. *Plant Soil* 333:117–128.
- Manyà J. 2012. Pyrolysis for Biochar Purposes: A Review to Establish Current Knowledge Gaps and Research Needs. *Environmental Science and Technology*. 46 (15): 7939–7954 p.
- Martínez E.H., Fuentes J.P.E., Acevedo E.H. 2008. Carbono orgánico y propiedades del suelo. *J. Soil Sc. Plant Nutr*. 8 (1):68-96.
- McElligott K. 2011. Tesis de maestría: Biochar amendments to forest soils: effects on soil properties and tree growth. 2011. Universidad de Idaho. 94 p.
- McElligott K., Page-Dumroese D., Coleman M. 2011. Bioenergy Production Systems and Biochar Application in Forests: Potential for Renewable Energy, Soil Enhancement, and Carbon Sequestration. United States Department of Agriculture. Forest service. Rocky mountain research station. Research note. 14 p.
- McLaughlin H., Anderson P.S., Frank E. Shields F.E. and Reed T.B. 2009. All Biochars are Not Created Equal, and How to Tell Them Apart. Version 2, which supercedes the digital reprint issued at the North American Biochar Conference, Boulder, CO.
- Miller-Robbie L., Ulrich B.A., Ramey D.F., Spencer K.S., Herzog S.P., Cath T.Y., Stokes J.R., Higgins C.P. 2015. Life cycle energy and greenhouse gas assessment of the co-production of biosolids and biochar for land application. *Journal of Cleaner Production*. 91:118-127.
- Mohan D., Pittman C.U., Steele P.H. 2006. Pyrolysis of Wood/Biomass for Bio-oil: A Critical Review. *Energy and Fuels*. 20 (3): 848-889.

- Muter O., Lebedeva G., y Galina Telysheva G. 2014. Evaluation of the changes induced by gasification biochar in a peat-sand substrate. *Int. Agrophys.* 28:471-478.
- Nigussie A., Kissi E., Misganaw M., y Ambaw G. 2012. Effect of biochar application on soil properties and nutrient uptake of lettuces (*Lactuca sativa*) grown in chromium polluted soils. *American-Eurasian J. Agric. & Environ. Sci.*, 12 (3):369-376
- Norma oficial mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000. Consulta: 31 de diciembre de 2002.
- Novak J.M., Busscher W.J., Laird D.L., Ahmedna M., Watts D.W.,¹ y Niandou M.A.S. 2009. Impact of Biochar Amendment on Fertility of a Southeastern Coastal Plain Soil. *Soil Science.* 174:105-112
- Ogunjobi y Lajide, 2013. Characterisation of bio-oil and bio-char from slow-pyrolised nigerian yellow and white corn cobs. *Journal of Sustainable Energy & Environment* 4: 77-84.
- ONU UNCCD. 2011. Desertificación. Una síntesis visual. ONU PNUMA/GRID-Arendal/ Zoi Environment Network. 50 p.
- ONU UNCCD. 2014. La desertificación esa invisible línea de frente. United nations convention to combat desertification. UN campus, Platz der Vereinten Nationen. Germany. 17 p. Web-site: www.unccd.int
- Parada B., Gallegos A., Velázquez A. y Hernández E. 2010. Guía para la medición de biomasa en plantaciones forestales de teca (*Tectona grandis* L.f. y cedro (*Cedrela odorata* L.) para determinar su potencial de captura de carbono. México. Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, Universidad de Guadalajara. 52 p.
- Pearcy R.W., Ehleringer J., Mooney H.A. y Rundel P.W. *Plant Physiological Ecology, Field Methods and Instrumentation.* 2000. The Netherlands. Kluwer Academic Publishers. 457 p.
- Pérez R.E. 2012. Tesis de maestría: Inoculación de bacterias promotoras de crecimiento vegetal en pepino (*cucumis sativus* L.). Colegio de postgraduados. Instituto de enseñanza e investigación en ciencias agrícolas. 103 p.
- Perez-Pimienta J.A., Lopez-Ortega M.G, Varanasi P., Stavila V., Gang Cheng G., Singh S., Simmons B.A. 2013. Comparison of the impact of ionic liquid pretreatment on recalcitrance of agave bagasse and switchgrass. *Bioresource Technology* 127: 18–24.

- Quilliam R.S., Marsden K.A., Gertler C., Rousk J., DeLuca T.H., Jones D.L. 2012. Nutrient dynamics, microbial growth and weed emergence in biochar amended soil are influenced by time since application and reapplication rate. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 158:192–199.
- Raven P.H., Evert R.F, Eichhorn S.E. 1992. *Biología de las plantas*. Vol 2. Editorial Reverté. S.A., España, 402 p.
- Revell K.T. 2011. Tesis de maestría: The effect of fast pyrolysis biochar made from poultry litter on soil properties and plant growth. Virginia Polytechnic Institute and State University. 76 p.
- Robledo-Olivo A., Noé-Aguilar C., Montañez-Sáenz J.C. 2012. Uso del olote de maíz como sustrato microbiano para la obtención de xilanasas. *Revista Científica de la Universidad Autónoma de Coahuila*. 7(4):1-1.
- Rondon M.A., Lehmann J., Ramírez J y Hurtado M. 2007. Biological nitrogen fixation by common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) increases with bio-char additions. *Biol Fertil Soils* 43:699–708.
- Sánchez, P. G. 2009. Manejo integral de la nutrición en el cultivo de cucurbitáceas a campo abierto. 1er Congreso Internacional de Cucurbitáceas. Guadalajara, Jalisco. México. <http://www.itson.mx/micrositios/nch/Documents/cucurbitaceas.pdf>.
- Schlegel B., Gayoso J., y Guerra J. 2000. Manual de Procedimientos, muestreo de biomasa forestal. Universidad Austral de Valdivia. Chile.
- Saval S. 2012. Aprovechamiento de residuos agroindustriales: Pasado, Presente y Futuro. *BioTecnología*. 16 (2):14-46.
- SEMARNAT.Suelos.(http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_resumen/pdf/3_info_resumen.pdf), Consulta: 2 /mayo/14
- SEMARNAT. 2009. El medio ambiente en México. En resumen. (http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/resumen_2009/03_suelos/cap3_2.html) Consulta:16/Julio/2014.
- SIAP. 2012. <http://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricola-por-cultivo/> Consulta: 5/Junio/2014
- Skutsch M., Rivas-Solórzano H., Jaramillo López P., Powell M., Rojas García J.M., Riegelhaupt E. 2011. Propuesta de protocolo: Biochar para el mejoramiento de suelos, incremento en la productividad agrícola y alternativa para mitigar el cambio climático. Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México. 11p.

- Sohi S., Lopez-Capel E., Krull E. y Bol R. 2009. Biochar, climate change and soil: A review of research needs. CSIRO Land and Water Science Report 05/09, 64 p.
- Sonneveld C y Kreij C. 1999. Response of cucumber (*Cucumis sativus* L.) to an unequal distribution of salt in the root environment. *Plant Soil*. 209:47-56.
- Sombroek, W.G., Kern, D.C., Rodrigues, T., Cravo, M da S., Cunha, T.J., Woods, W., & Glaser, B. 2002. Terra preta and Terra Mulata, pre-Colombian kitchen middens and agricultural fields, their sustainability and replication. En: R. Dudal. (Ed.), Symposium 18, Anthropogenic factors of soil formation, 17th World Congress of Soil Science. August 2002. Bangkok: Transactions (CD-ROM).
- Sombroek W., Ruivo M de L., Fearnside P.M., Glaser B., Lehmann J. 2003. Amazonian dark earths as carbon stores and sinks. 125-139 en: Lehmann J., Kern D.C., Glaser B. y Woods W.I. (eds.). Amazonian Dark Earths: Origin, Properties, Management. Kluwer Academic Publishers, 505 p.
- Sorek N, Yeats T.H., Szemenyei H., Youngs H., and Somerville C.R. 2014. The Implications of Lignocellulosic Biomass Chemical Composition for the Production of Advanced Biofuels. *BioScience* 20(10):1-10.
- Sparkes S. y Stoutjesdijk P. Technical report: Biochar: Implications for agricultural productivity. 2011. Australian Government, Department of Agriculture, Fisheries and Forestry, Australian Bureau of Agricultural and Resource Economics and Sciences, Commonwealth of Australia. 54 p.
- Spokas K.A., Baker J.M., Reicosky D.C. 2010. Ethylene: potential key for biochar amendment impacts. *Plant Soil*. 333:443-452.
- Steiner C., Teixeira W. G., Lehmann J., Nehls T., Macedo J. L. V., Blum, W. E. H., y Zech W. 2007. Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil. *Plant and Soil*. 291:275-290.
- Steiner C., Charcoal as soil amendment. Research and prospects. Carbon negative energy and soil restoration. 2007. UN Climate Change Conference 2007. Bali-Indonesia. <http://www.biochar.org/joomla/images/stories/Pechoelbrennen/SteinerUNCCD.pdf>
- Sukartono, Utomo W.H., Kusuma Z y Nugroho W.H. 2011. Soil fertility status, nutrient uptake, and maize (*Zea mays* L.) yield following biochar and cattle manure application on sandy soils of Lombok, Indonesia. *Journal of Tropical Agriculture* 49(1-2):47-52.
- Tammeorg P., Simojoki A., Mäkelä P., Stoddard F.L., Laura Alakukku L., Helenius J. 2014. Short-term effects of biochar on soil properties and wheat yield formation with meat bone meal and inorganic fertiliser on a boreal loamy sand. *Agriculture, Ecosystems and Environment*.

- TAPPI.1998. TAPPI TEST METHODS. 1998-1999 TEST METHODS. TAPPI PRESS. USA.
- Thompson W. H., Leege P.B., Millner P.D. y Watson M.D. 2001. Test Methods for the examination of composting and compost. Joint project of the united states department of agriculture and the united states composting council. Manual format.
- Tiessen H., Cuevas E., y Chacon P. 1994. The role of soil organic matter is sustaining soil fertility. *Nature*. 371:587-615.
- Torres-Benites E., Cortes- Becerra J., Mejía- Sáenz E., Exebio-García A., Santos-Hernández A.L. y Delgadillo Piñón M.E. 2003. Evaluación de la degradación de los suelos en la Cuenca “el Josefino”, Jesús María, Jalisco.
- Trejo-Téllez L.I., Rodríguez-Mendoza M.N.R, Gabriel Alcántar-González G. y Vázquez-Alarcón A. 2003. Fertilización foliar específica para corregir deficiencias nutrimentales en tres tipos de suelo. *Terra Latinoamericana* 21(3):365-372.
- Tryon E. H. 1948. Effect of Charcoal on Certain Physical, Chemical, and Biological Properties of Forest Soils. *Ecological Monographs*. Ecological Society of America 18(1):81-115.
- US Compost Council. Seal of Testing Assurance. 2010. <http://compostingcouncil.org/tmecc/>. Consulta 23/ marzo de 2015
- Valdez-Vazquez I., Acevedo-Benitez J. A. y Hernandez-Santiago C. 2010. Distribution and potential of bioenergy resources from agricultural activities in Mexico. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 14: 2147-2153.
- Van Zwieten L, Singh B., Joseph S., Kimber S., Cowie A. y Chan K. Y. 2009. Biochar and Emissions of Non-CO2 Greenhouse Gases from Soil. En: *Biochar for Environmental Management*. Lehmann J. and Joseph S. Earthscan Publishing for a sustainable future: UK y USA. 227-249 p.
- Van Zwieten L. Kimber S., Morris S., Chan K.Y., Downie A., Rust J., Joseph S. y Cowie A. 2010. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. *Plant Soil*. 327:235–246.
- Yamato M., Okimori Y., Wibowo I.F., Anshori S., y Ogawa M. 2006. Effects of the application of charred bark of *Acacia mangium* on the yield of maize, cowpea and peanut, and soil chemical properties in South Sumatra, Indonesia. *Soil Science and Plant Nutrition* 52:489-495.
- Yuan, J., Xu, R., Zhang, H. 2011. The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperaturas. *Bioresource Technology* 102(3):3488–3497.

- Walkley A. y Black A. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37:29-38.
- Wardle D.A., Nilsson M-C., Zackrisson O. 2008. Fire-Derived Charcoal Causes Loss of Forest Humus. *Science* 320(5876): 629 p.
- 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.
- Zheng W., Sharma BK., Rajagopalan N. 2010. Using Biochar as a Soil Amendment for Sustainable Agriculture. Illinois Sustainable Technology Center University of Illinois at Urbana-Champaign. 36 p.