

**UNIVERSIDAD RAFAEL LANDÍVAR**  
FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES Y AGRÍCOLAS  
LICENCIATURA EN CIENCIAS AGRÍCOLAS CON ÉNFASIS EN CULTIVOS TROPICALES

PIRÓLISIS DE BIOMASA PARA LA OBTENCIÓN DE BIOCARBÓN Y SU EFECTO EN EL  
RENDIMIENTO DE TOMATE  
TESIS DE GRADO

**JAQUELINE DENISSE HERRERA CULEBRO**  
CARNET 22783-12

COATEPEQUE, MAYO DE 2018  
SEDE REGIONAL DE COATEPEQUE

**UNIVERSIDAD RAFAEL LANDÍVAR**  
FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES Y AGRÍCOLAS  
LICENCIATURA EN CIENCIAS AGRÍCOLAS CON ÉNFASIS EN CULTIVOS TROPICALES

PIRÓLISIS DE BIOMASA PARA LA OBTENCIÓN DE BIOCARBÓN Y SU EFECTO EN EL  
RENDIMIENTO DE TOMATE

TESIS DE GRADO

TRABAJO PRESENTADO AL CONSEJO DE LA FACULTAD DE  
CIENCIAS AMBIENTALES Y AGRÍCOLAS

POR

**JAQUELINE DENISSE HERRERA CULEBRO**

PREVIO A CONFERÍRSELE

EL TÍTULO DE INGENIERA AGRÓNOMA CON ÉNFASIS EN CULTIVOS TROPICALES EN EL GRADO  
ACADÉMICO DE LICENCIADA

COATEPEQUE, MAYO DE 2018  
SEDE REGIONAL DE COATEPEQUE

## **AUTORIDADES DE LA UNIVERSIDAD RAFAEL LANDÍVAR**

RECTOR: P. MARCO TULIO MARTINEZ SALAZAR, S. J.

VICERRECTORA ACADÉMICA: DRA. MARTA LUCRECIA MÉNDEZ GONZÁLEZ DE PENEDO

VICERRECTOR DE INVESTIGACIÓN Y PROYECCIÓN: ING. JOSÉ JUVENTINO GÁLVEZ RUANO

VICERRECTOR DE INTEGRACIÓN UNIVERSITARIA: P. JULIO ENRIQUE MOREIRA CHAVARRÍA, S. J.

VICERRECTOR ADMINISTRATIVO: LIC. ARIEL RIVERA IRÍAS

SECRETARIA GENERAL: LIC. FABIOLA DE LA LUZ PADILLA BELTRANENA DE LORENZANA

## **AUTORIDADES DE LA FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES Y AGRÍCOLAS**

DECANA: LIC. ANNA CRISTINA BAILEY HERNÁNDEZ

SECRETARIO: MGTR. LUIS MOISES PEÑATE MUNGUÍA

## **NOMBRE DEL ASESOR DE TRABAJO DE GRADUACIÓN**

LIC. ABEL ESTUARDO SOLÍS ARRIOLA

## **TERNA QUE PRACTICÓ LA EVALUACIÓN**

ING. WALTHER DAVID MAYÉN CABRERA

Guatemala 27 de abril de 2018

Consejo de Facultad  
Ciencias Ambientales y Agrícolas  
Presente

Estimados miembros del Consejo:

Por este medio hago constar que he asesorado el trabajo de graduación del estudiante Jaqueline Denisse Herra Culebro, carné 2278312, titulada: **"Pirólisis de biomasa para la obtención de biocarbón y su efecto en el rendimiento de tomate"**.

La cual considero que cumple con los requisitos establecidos por facultad, previo a su autorización de impresión.

Atentamente,



Lic. Abel Estuardo Solis Arriola.  
Cod. URL 21417



Universidad  
Rafael Landívar  
Tradición Jesuita en Guatemala

FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES Y AGRÍCOLAS  
No. 06947-2018

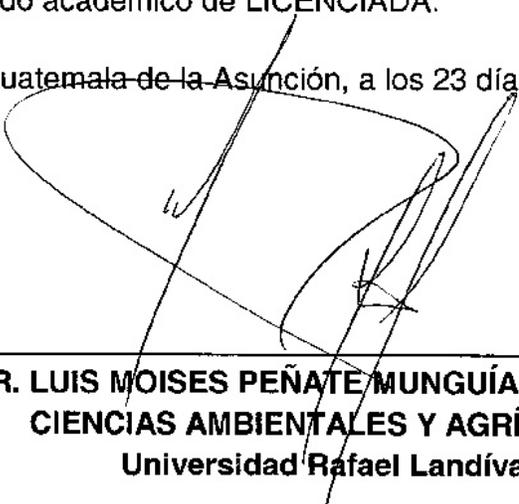
### Orden de Impresión

De acuerdo a la aprobación de la Evaluación del Trabajo de Graduación en la variante Tesis de Grado de la estudiante JAQUELINE DENISSE HERRERA CULEBRO, Carnet 22783-12 en la carrera LICENCIATURA EN CIENCIAS AGRÍCOLAS CON ÉNFASIS EN CULTIVOS TROPICALES, de la Sede de Coatepeque, que consta en el Acta No. 0691-2018 de fecha 22 de mayo de 2018, se autoriza la impresión digital del trabajo titulado:

**PIRÓLISIS DE BIOMASA PARA LA OBTENCIÓN DE BIOCARBÓN Y SU EFECTO EN EL RENDIMIENTO DE TOMATE**

Previo a conferírsele el título de INGENIERA AGRÓNOMA CON ÉNFASIS EN CULTIVOS TROPICALES en el grado académico de LICENCIADA.

Dado en la ciudad de Guatemala de la Asunción, a los 23 días del mes de mayo del año 2018.

  
MGTR. LUIS MOISES PEÑATE MUNGUÍA, SECRETARIO  
CIENCIAS AMBIENTALES Y AGRÍCOLAS  
Universidad Rafael Landívar



## **AGRADECIMIENTOS**

**A:**

Dios que me dio la vida, la sabiduría y la bendición de superarme.

La Universidad Rafael Landívar, Facultad de Ciencias Ambientales y Agrícolas sede Coatepeque por ser parte de mi formación.

Al claustro docente de la Escuela Oficial Rural Mixta Comunidad Agraria La Esmeralda y Escuela Oficial Urbana Mixta Inocencia López de Campollo, Coatepeque por apoyarme en la ejecución y defensa de tesis y actividades curriculares de mi carrera.

A todas las personas que formaron parte de mi formación como Ingeniera Agrónoma mis sinceros agradecimientos.

## **DEDICATORIA**

**A:**

Dios: Por darme la oportunidad de cumplir mi anhelo, y siempre estar presente en todas y cada una de las decisiones que tomé y tomaré en la vida.

Mis padres: Carlos Enrique Herrera Maldonado y Judith Azucena Culebro Rivadeneira de Herrera a quienes quiero mucho, por su inmenso amor, por su tiempo, sus consejos oportunos y por su ejemplo a seguir.

Mis hijos: Carlos Fernando López Herrera, Alexandra Eunice López Herrera y José Enrique Solis Herrera, gracias por formar parte de este proceso y por brindarme apoyo en todo momento.

Mi familia: Abuelos, hermanos, tíos, primos, sobrinos y cuñados que de una u otra forma han contribuido en mi formación.

Mi esposo: Abel Estuardo Solis Arriola, gracias por apoyarme en todo momento durante cada una de las facetas de la carrera, por ser mi pilar y mi soporte.

Mis amigos: Por su apoyo, compañía y formar parte de mi desarrollo integral, con mucho aprecio.

# ÍNDICE GENERAL

	<b>Página</b>
RESUMEN.....	ix
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. MARCO TEÓRICO.....	2
2.1 Cultivo de tomate.....	2
2.2 Pirólisis de biocarbón.....	6
2.3 Antecedentes.....	16
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	20
3.1 Definición y justificación del trabajo.....	20
4. OBJETIVOS.....	22
4.1 General.....	22
4.2 Específicos.....	22
5. HIPÓTESIS.....	23
5.1 Hipótesis alterna.....	23
6. METODOLOGÍA.....	24
6.1 Localización.....	24
6.2 Material experimental.....	24
6.3 Factores a estudiar.....	24
6.4 Descripción de los tratamientos.....	24
6.5 Diseño experimental.....	25
6.6 Modelo estadístico.....	25
6.7 Unidad experimental.....	25
6.8 Croquis de campo.....	26
6.9 Manejo del experimento.....	26
6.10 Variables de respuesta.....	31
6.11 Análisis de la información.....	33
7. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	34
7.1 Análisis de la fertilidad del suelo antes y después de la aplicación de biocarbón.....	34
7.3 Días a cosecha.....	40
7.4 Rendimiento (kg/ha).....	43

7.5 Volumen de la raíz.....	48
7.6 Área correspondiente a la cantidad de material vegetal a utilizar para elaborar 20 ton de biocarbón .....	50
7.7 Análisis de costos .....	53
8. CONCLUSIONES .....	56
9. RECOMENDACIONES .....	57
10. BIBLIOGRAFÍA.....	58
11. ANEXOS.....	64

## ÍNDICE DE CUADROS

<b>Cuadro</b>	<b>No</b>
1. Clasificación taxonómica del cultivo de tomate. ....	3
2. Características físicas del suelo para cultivo de tomate. ....	5
3. Características químicas del suelo para el cultivo de tomate. ....	6
4. Tratamientos utilizados en la investigación. ....	25
5. Plan de fertilización. ....	29
6. Productos químicos utilizados para el control de insectos dañinos. ....	29
7. Fungicidas al suelo a utilizados en la investigación. ....	30
8. Fungicidas foliares que se utilizaron en el manejo del experimento. ....	30
9. Acaricidas y bactericidas utilizados durante el manejo del experimento. ....	30
10. Resultado del análisis de suelos de pH, M.O. N, P, K, Ca y Mg. ....	34
11. Niveles de acidez intercambiable, Fe, Mn, Zn y B por tratamiento. ....	36
12. Capacidad de intercambio catiónica efectiva por tratamiento. ....	37
13. Promedio de días de floración por tratamiento. ....	38
14. Análisis de varianza de la variable días a floración. ....	39
15. Análisis de varianza de la variable días a cosecha. ....	42
16. Porcentaje de la producción por corte realizado en cosecha de tomate. ....	43
17. Análisis de varianza de la variable rendimiento (kg/ha) ....	44
18. Prueba de Tukey de la variable rendimiento (kg/ha) ....	45
19. Análisis de varianza de la variable volumen de la raíz (cm <sup>3</sup> ) ....	48
20. Prueba de Tukey de la variable volumen de la raíz (cm <sup>3</sup> ). ....	49
21. Área que se necesita para obtener 20 ton/ha de biocarbón. ....	51
22. Costos de producción de una hectárea de tomate. ....	53
23. Costos totales por tratamiento. ....	54
24. Relación beneficio/costo. ....	55

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura</b>	<b>No</b>
1. Unidad experimental a utilizar en la investigación. ....	26
2. Croquis de campo de la investigación. ....	26
3. Días a cosecha en cultivo de tomate utilizando diferentes fuentes de biocarbón. ....	41

# **PIRÓLISIS DE BIOMASA PARA LA OBTENCIÓN DE BIOCARBÓN Y SU EFECTO EN EL RENDIMIENTO DE TOMATE.**

## **RESUMEN**

La investigación se realizó en la Hacienda Gracias a Dios, en donde se evaluó la pirólisis de biomasa para la obtención de biocarbón y su efecto en el rendimiento de tomate. Para ello, se utilizó como fuente vegetal, olote de maíz, rastrojo de maíz, rastrojo de ajonjolí, cascarilla de arroz y un testigo absoluto. Con un diseño experimental, se aplicó 20 ton/ha de biocarbón, 5 tratamientos y 4 repeticiones. Las variables de respuesta evaluadas fueron: días a floración, días a cosecha, rendimiento (kg/ha), volumen de la raíz (cm<sup>3</sup>), área de cultivo que se necesita para producir 20 Ton de biocarbón, análisis de suelo y relación beneficio/costo. De acuerdo a los resultados obtenidos, no existe diferencia estadística en cuanto a días a floración y cosecha, mientras que el tratamiento que presentó mayor rendimiento fue el biocarbón de olote de maíz con 45195.3 kg/ha, con respecto al volumen de la raíz el olote de maíz fue el que presentó mayor volumen de raíz con 44.25 cm<sup>3</sup>. Para obtener 20 ton de biocarbón de olote de maíz se necesita cosechar 31.15 ha de maíz, mientras que el análisis de suelos, el tratamiento de olote de maíz mejoró la CICE con 7.82 Cmol(+)/L. Previo a la investigación esta fue de 6.59 Cmol(+)/L, y el mismo tratamiento fue el que obtuvo mayor relación beneficio/costo con 0.74 y el testigo absoluto obtuvo 0.35.

# 1. INTRODUCCIÓN

El cultivo de tomate tiene un alto valor económico en la zona agrícola de Coatepeque, conjuntamente con maíz y ajonjolí se convierte en un cultivo muy recurrente en los pequeños productores quienes viven de los ingresos productos de la venta de los frutos cosechados. Las problemáticas actuales en la zona, están caracterizadas por el pobre rendimiento del cultivo de tomate (menor a 36 ton/ha), el costo alto de los fertilizantes, las plagas y enfermedades asociadas carecen de aperos de labranza que ayude a la incorporación.

La utilización de biocarbón en la agricultura mejora las condiciones físicas, químicas y biológicas del suelo. El empleo del biocarbón puede aumentar la fertilidad del suelo, reducir los gastos de abonos, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero del suelo utilizado con fines agrícolas, estabilizar el suministro de agua de las plantas, aún durante los largos periodos de sequía, y mantener por más tiempo el carbono del suelo (Arbaz, 2011).

La pirólisis es básicamente un proceso de calentamiento de la biomasa para obtención de biocarbón en ausencia de oxígeno, en el cual se produce una descomposición de la biomasa en una fracción de gases volátiles condensables de los cuales se obtienen los bioaceites, una fracción de gases incondensables y la materia sólida remanente, denominada biocarbón (Cobo, 2012).

Aunado a lo anterior, el tipo de material vegetal a utilizar influyen en la efectividad del mismo en la productividad de los cultivos, es por tal razón que en la presente investigación se evaluó cuatro materiales vegetales (rastroy de maíz, ajonjolí, cascarilla de arroz y olote de maíz) para la obtención de biocarbón en el cultivo de tomate en Aldea Santa María el Naranjo, Coatepeque Quetzaltenango.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Cultivo de tomate

**2.1.1 Origen y distribución.** Según Pérez (2011), citando a la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación –FAO- (2007), el tomate es originario de América del sur, entre las regiones de Chile, Ecuador y Colombia, pero su domesticación se inició en el sur de México y norte de Guatemala. Las formas silvestres de “tomate cereza”, (*Lycopersicon esculentum*, Solanaceae) var. Cerasiforme, originarias de Perú, migraron a través del Ecuador, Colombia, Panamá y América Central hasta llegar a México, donde fue domesticado por el hombre; en la lengua nahua de México era llamado *tomatl*, que sin lugar a dudas dio origen a su nombre actual.

**2.1.2 Superficie cultivada y destino de producción.** Es cultivado en muchas zonas, con amplia variabilidad de condiciones de clima y suelo, aunque se cultiva principalmente en climas secos, tanto para producción en estado fresco como para uso agroindustrial.

Según MAGA (2014), de acuerdo con las estadísticas registradas por Guatemala en la SIECA, durante el año 2013, Guatemala ha registrado exportaciones de tomate al resto de la región, por valor de, USD 5,64 millones, correspondientes a 52.973 toneladas. El comportamiento de las exportaciones durante los últimos diez años, puede concluirse que el volumen de mercado ha presentado un crecimiento importante, especialmente durante los últimos dos años, aunque el valor reportado en dólares no ha tenido un crecimiento similar, de donde se infiere que los precios han venido en retroceso. Una de las posibles causas de esta situación, es el incremento de enfermedades del tomate que están afectando de forma significativa a los productores nacionales, especialmente con el incremento de las virosis del tomate, lo cual resta calidad al producto final y afecta de forma significativa los precios.

### 2.1.3 Taxonomía y morfología

**2.1.3.1 Clasificación taxonómica.** De acuerdo a Escalona *et. al.* (2009), el tomate cultivado corresponde, básicamente a *L. esculentum*, aunque también se cultiva una fracción de la variedad

botánica *cerasiforme* y de *Lycopersicon pimpinellifolium* ("cherry", "cereza", o "de cóctel"). El mejoramiento ha generado muchas variedades distintas para fines muy específicos.

La clasificación taxonómica es:

**Cuadro 1.**

*Clasificación taxonómica del cultivo de tomate.*

Clasificación	Nombre
Phylum	Streptophyta
Orden	Solanales
Familia	Solanaceae
Género	<i>Solanum</i>
Subgénero	<i>Lycopersicon</i>
Especie	<i>L. esculentum</i>

Fuente: ITIS, 2016.

### 2.1.3.2 Morfología del cultivo

**2.1.3.2.1 La semilla.** La semilla de tomate es aplanada y de forma lenticelar con dimensiones aproximadas de 3 x 2 x 1 mm se almacena por períodos prolongados se aconseja hacerlo a humedad del 5.5%. Una semilla de calidad deberá tener un porcentaje de germinación arriba del 95% (CENTA, 2008).

**2.1.3.2.2 Germinación.** De acuerdo a CENTA (2008) el proceso de germinación comprende tres etapas: a- Rápida absorción, que dura 12 horas, se produce una rápida absorción de agua. b- Reposo, dura 40 horas, durante la cual no se observa ningún cambio; la semilla comienza a absorber agua de nuevo. c- Crecimiento: asociada al proceso de germinación de la semilla.

**2.1.3.2.3 Planta.** El tomate puede presentar básicamente dos hábitos de crecimiento: determinado e indeterminado. La planta indeterminada es la normal y se caracteriza por tener un crecimiento extensivo, postrado, desordenado y sin límite. En ella, los tallos presentan segmentos uniformes con tres hojas (con yemas) y una inflorescencia, terminando siempre con un ápice vegetativo, (Escalona *et. al.*, 2009).

**2.1.3.2.4 Sistema radical.** El sistema radicular del tomate está constituido por: la raíz principal, las raíces secundarias y las adventicias. Generalmente se extiende superficialmente sobre un diámetro de 1.5 m y alcanza mas de 0.5 m de profundidad; sin embargo, el 70% de las raíces se localizan a menos de 0.20 m de la superficie (CENTA, 2008).

**2.1.3.2.5 Tallo principal.** Los tallos son ligeramente angulosos, semileñosos, de grosor mediano y con tricomas (pilosidades), simples y glandulares. Eje con un grosor que oscila entre 2-4 cm en su base, sobre el que se van desarrollando las hojas, tallos secundarios e inflorescencias (Escalona *et. al.*, 2009).

**2.1.3.2.6 Hojas.** Las hojas son compuestas e imparipinnadas, con foliolos peciolados, lobulados y con borde dentado, en número de 7 a 9 y recubiertos de pelos glandulares. Las hojas se disponen de forma alternada sobre el tallo (Escalona *et. al.*, 2009).

**2.1.3.2.7 Flor.** La flor del tomate es perfecta, de color amarillo, consta de 5 ó más sépalos, 5 ó más pétalos y de 5 a 6 estambres; se agrupan en inflorescencias de tipo racimo cimoso y compuesto por 4 a 12 flores (CENTA, 2008).

**2.1.3.2.8 Fruto.** baya bi o plurilocular que puede alcanzar un peso que oscila entre unos pocos miligramos y 600 gramos. Está constituido por el pericarpio, el tejido placentario y las semillas (Escalona *et. al.*, 2009).

**2.1.4 Requerimientos edáficos y climáticos.** La duración del ciclo del cultivo de tomate está determinada por las condiciones climáticas de la zona en la cual se establece el cultivo, el suelo, el manejo agronómico que se dé a la planta, el número de racimos que se van a dejar por planta y la variedad utilizada (Pérez, 2011).

**2.1.4.1 Radiación.** El tomate requiere días soleados para un buen desarrollo de la planta y lograr una coloración uniforme en el fruto. La baja luminosidad afecta los procesos de floración, fecundación y desarrollo vegetativo de la planta y reduce la absorción de agua y nutrientes (Pérez, 2011).

**2.1.4.2 Altitud.** El tomate puede cultivarse desde los 20 a los 2000 msnm, tomando en cuenta la capacidad de adaptación de cada variedad o híbrido (CENTA, 2008).

**2.1.4.3 Temperatura.** Basterrechea (2005) establece que la temperatura óptima de desarrollo oscila entre 20 y 30 ° C durante el día y entre 1 y 17°C durante la noche; temperaturas superiores a los 30-35 °C afectan a la fructificación, por mal desarrollo de óvulos y al desarrollo de la planta en general del sistema radicular en particular.

**2.1.4.4 Humedad del aire.** En el cultivo de tomate, es conveniente que la humedad relativa (HR) del aire sea entre 70 y 80%, los valores superiores favorecen el desarrollo de enfermedades del follaje (CENTA, 2008).

**2.1.4.5 Suelos.** Las características físicas y químicas del suelo para que el tomate tenga un desarrollo óptimo, se resumen en el siguiente cuadro:

**Cuadro 2.**

*Características físicas del suelo para cultivo de tomate.*

<b>Características físicas</b>	<b>Rango óptimo</b>
Textura	Franco a franco arcillosa
Profundidad efectiva	>80 cm
Densidad aparente	1.20 g/cc
Color	Oscuro
Contenido de materia orgánica	>3.5%
Drenaje	Bueno
Capacidad de retención de humedad	Buena
Topografía	Plano o semi-plano
Humedad	granular

Fuente: CENTA, 2008.

**Cuadro 3.**

*Características químicas del suelo para el cultivo de tomate.*

<b>Características químicas</b>	<b>Rango óptimo</b>
pH	5.5 – 6.0
Nitrógeno	Según tipo de suelo
Fósforo	13- 40 ppm
Potasio	5%
Calcio	15%
Magnesio	18%
Acidez total	<10%
Conductividad eléctrica	0.75 – 2.0 mmho/cm <sup>2</sup>

Fuente: CENTA, 2008.

El tomate prospera en diferentes tipos de suelo, aunque los más indicados son los suelos sueltos, fértiles, bien aireados y con buen drenaje interno y, la capacidad de retener humedad, de texturas francas a franco arcillosas, con contenidos de materia orgánica altos, por encima del 5%, y buen contenido de nutrientes (Pérez, 2011).

## **2.2 Pirólisis de biocarbón**

La pirólisis es básicamente un proceso de calentamiento de la biomasa en ausencia de oxígeno, en el cual se produce una descomposición de la biomasa en una fracción de gases volátiles condensables de los cuales se obtienen los bioaceites, una fracción de gases incondensables y la materia sólida remanente, denominada biocarbón.

Más adelante se presentan dos clasificaciones de los diferentes tipos de pirolisis, se pueden distinguir diferentes tipos de pirolisis, entre las que se distinguen la carbonización realizada a bajas temperaturas y bajas velocidades de calentamiento, la pirolisis rápida, realizada a temperaturas altas y altas velocidades de calentamiento (Cobos, 2012).

Las técnicas de tratamiento térmico de residuos se dividen en dos grandes categorías: 1) Los que se queman en presencia de oxígeno, es decir, las técnicas de incineración; y 2) Los que se

someten a altas temperaturas los residuos en ausencia de o con poco oxígeno, de modo que no hay combustión directa, es decir, la pirólisis (a veces denominada termólisis) y la gasificación (Bilbao, 2009).

Desde principios de la década del 1990, las condiciones medioambientales a nivel mundial (efecto de gases de invernadero), hicieron considerar la pirólisis de la biomasa como una alternativa para fijar el carbón de la atmósfera. Los estudios realizados acerca de este proceso se incrementaron notoriamente. Una revisión de los diferentes aportes realizados en el tema, en cuanto a análisis y adelantos del proceso condujeron experimentos con diferentes tipos de biomasa, entre ellas bagazo de caña de azúcar, en un reactor experimental de pirólisis rápida, a fin de determinar la influencia de diferentes parámetros del proceso en la composición y cantidad del gas final obtenido. El trabajo logró comprobar que la pirólisis rápida es un paso previo a la gasificación, encontrando rendimientos de biocarbón del 10% a 800 ° C para bagazo (Cobos, 2012).

Cuando en una incineradora se reduce el nivel de oxígeno por debajo del óptimo para la combustión, se dice que la planta funciona “con aire controlado” o en “modo pirolítico”. La pirólisis se define como la degradación térmica de una sustancia en ausencia de oxígeno o con una cantidad limitada del mismo (Bilbao, 2009).

Durante la pirólisis cierta oxidación y se formarán, por tanto, dioxinas y otros productos relacionados con una combustión incompleta. La pirólisis se lleva a cabo habitualmente a temperaturas de entre 400 °C y 800 °C. A estas temperaturas los residuos se transforman en gases, líquidos y cenizas sólidas denominadas “coque” de pirólisis. Las proporciones relativas de los elementos producidos dependen de la composición de los residuos, de la temperatura y del tiempo que ésta se aplique. Una corta exposición a altas temperaturas recibe el nombre de pirólisis rápida y, maximiza el producto líquido. Si se aplican temperaturas más bajas durante períodos de tiempo más largos, predominarán las cenizas sólidas (Bilbao, 2009).

## 2.2.1 Tipos de pirolisis

**2.2.1.1 Pirólisis lenta.** La pirólisis lenta, comparable a la que se ha utilizado durante siglos en las carboneras de nuestros bosques, se basa en la combustión parcial de la biomasa por calentamiento uniforme y lento (aproximadamente 0,01-2°C/seg) a temperaturas entre 450 y 650°C, y prácticamente sin oxígeno, con la captura simultánea de los gases producidos para la obtención de syngas, transformando aproximadamente un 40% de la biomasa original en biochar.

Para la producción de este tipo de biochar se precisa de tiempos de residencia de horas a días. La reacción pirolítica es medianamente endotérmica, siendo la mayor parte de energía capturada en forma de syngas y condensados de bioaceite. El biochar tiene una energía residual de aproximadamente 30-35 MJ/kg (García, 2010). La energía extraída del proceso puede utilizarse para retroalimentar el mismo o para el secado de la materia prima. También, puede quemarse el syngas para generar calor o electricidad.

**2.2.1.2 Pirólisis rápida.** Se caracteriza por un calentamiento muy rápido de la materia prima, lo cual conlleva a una mayor producción de bioaceite en comparación con la producción de biochar.

De esta forma, a diferencia de la pirólisis lenta, el tiempo necesario para alcanzar el pico de temperatura del proceso endotérmico (tiempo de residencia) es de aproximadamente uno o dos segundos, siendo de minutos a horas el de la pirólisis lenta. Esta técnica opera a temperaturas relativamente moderadas (450 °C), mediante la introducción de pequeñas cantidades de biomasa en la cámara de pirólisis, extrayendo los gases de forma casi instantánea y condensándolos, para producir aproximadamente un 65% de líquidos biocombustibles, cuyo contenido de energía por unidad de volumen es casi la mitad que el del gasoil. Este biocombustible se considera ventajoso a diferencia de otros, derivados del petróleo, por sus nulas o bajas emisiones de óxidos de azufre y de nitrógeno en su combustión (Bridgewater, 2004). La producción de biochar es de aproximadamente un 15% y tiene una energía residual de 23-32 MJ/Kg (Demirbas, 2006).

Los productos principales de la pirólisis de biomasa son tres: la sólida, llamada biocarbón (biochar en inglés), líquida denominada bioaceite y la gaseosa biogas o gas pobre. La fracción de cada uno de estos tres componentes depende de las condiciones propias de la biomasa y de los parámetros bajo los cuales es ejecutado el proceso. A continuación se hace una breve descripción de los productos y sus posibles aplicaciones, siendo estos Bioaceite, Biogás y Biocarbón (Cobos, 2012).

**2.2.1.2.1 Bioaceite.** La investigación en procesos termoquímicos de biomasa, en las últimas dos décadas está encaminada a la obtención de productos líquidos, que sean materia prima en tratamientos posteriores para la obtención de hidrocarburos. La necesidad de disminuir las emisiones de CO<sub>2</sub>, como principal causante del calentamiento global y los requerimientos energéticos mundiales han impulsado la investigación en el campo de la pirólisis rápida como tecnología en la obtención de productos líquidos a partir de pirólisis de biomasa residual forestal y agrícola. El bioaceite es una mezcla líquida de compuestos oxigenados, conteniendo varios grupos químicos funcionales tales como carbonilos, carboxilos y fenoles (Cobos, 2012).

**2.2.1.2.2 Biogas.** El segundo producto del proceso de pirólisis de biomasa son los gases no condensables. La literatura reporta una composición principal de monóxido de carbono, dióxido de carbono, metano, hidrógeno, hidrocarburos de bajo peso molecular y otros no especificados

En el proceso de pirólisis estos gases no condensables se emplean generalmente como fuente de energía en el mismo proceso, debido a su bajo poder calorífico (5-10 MJ/Nm<sup>3</sup>).

Por otro lado, existen otras aplicaciones para emplear los gases no condensables con altos contenidos de monóxido y dióxido de carbono en una celda de combustible de carbón fundido. En este trabajo se determinó una eficiencia total del proceso de producción de energía eléctrica del 43% (Cobos, 2012).

**2.2.1.2.3 Biocarbón.** De acuerdo a Arbaz (2011), el biocarbón es un material sólido rico en carbón que se crea a través del calentamiento de biomasa en un entorno pobre de oxígeno (pirólisis) y que se aplica para la mejora del suelo. La pirólisis de la biomasa se produce a temperaturas comprendidas desde un mínimo de 350° C hasta un máximo de 900° C.

Otros procesos más que entran dentro de la carbonización son: torrefacción, carbonización hidrotérmica y la coquización, cuyos productos finales no pueden denominarse biocarbón y que, por lo tanto, requieren una consideración aparte en lo que a su aplicación en suelos se refiere.

**2.2.2 Uso de biocarbón en la agricultura.** Los carbones pirolíticos que no han sido elaborados a partir de biomasa cien por ciento naturales o que se han fabricado con parámetros de procesos insuficientemente elaborados, se denominados pirocarbones y no pueden utilizarse como materiales de enriquecimiento del suelo. A continuación, definiremos más detalladamente qué es el biocarbón.

La utilización de biocarbón en la agricultura tiene el potencial de mejorar las condiciones físicas, químicas y biológicas del suelo. El empleo del biocarbón puede aumentar la fertilidad del suelo, reducir los gastos de abonos, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero del suelo utilizado con fines agrícolas, estabilizar el suministro de agua de las plantas, aún durante los largos periodos de sequía, y mantener por más tiempo el carbono del suelo. El biocarbón reduce la degradación de los nutrientes y fija las materias dañinas que existan previamente en el suelo.

El biocarbón mejora las condiciones del suelo y la dinámica de los nutrientes, pero no es un abono en sí mismo. Las plantas solo pueden disponer de los minerales que contiene el biocarbón de forma muy condicionada. Estos minerales quedan eficientemente fijados por el carbón, en comparación con abonos, solo presentan unas cuotas de degradación muy bajas. En cultivo ecológico, el biocarbón debería estar permitido como material aditivo para el suelo, o como aditivo al compostaje (Arbaz, 2011).

**2.2.3 Biomasa utilizada.** La biomasa utilizada para el proceso de pirólisis puede tener diferentes orígenes, siendo la agricultura, ganadería, sector forestal y residuos municipales los más habituales. De esta manera, restos de poda, biomasa procedente de diferentes cultivos, residuos diversos de actividades ganaderas y lodos de depuradora pueden ser materiales a pirolizar. En el futuro la materia prima debería elegirse en función de la ratio de subproductos deseados y la técnica de pirólisis a utilizar. En el caso de priorizar la obtención de biochar, el material de partida condiciona alguna de sus características como el contenido de macro y micronutrientes, la estructura física, la capacidad de retención de agua, etc., lo cual, es de suma importancia para los efectos que el biochar puede tener al ser aplicado como enmienda de suelos (Sohi, *et al.*, 2009).

Existen diferentes tipos de procesos pirolíticos industriales siendo tres los principales: pirólisis lenta, rápida y gasificación. No obstante, es conveniente comentar la existencia de múltiples variantes como la carbonización o la pirólisis intermedia, o el uso de técnicas combinadas dentro de un mismo proceso como sería la pirólisis lenta con gasificación (Alcañiz, 2012).

**2.2.4 El biocarbón como material para la mejora del suelo.** Se utilizan desde hace cientos de años como medios para mejorar el suelo. Mientras que en Japón y algunas zonas de Asia Oriental y Latinoamérica se ha seguido utilizando el biocarbón como parte de las prácticas agrícolas, en Europa cayó en el olvido a partir de comienzos del S. XX. Ha sido, el creciente problema del calentamiento climático, ha llevado a la ciencia en estas últimas décadas a volver a utilizar el biocarbón, redescubierto como posible método para disminuir la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, dando con ello un nuevo impulso a la investigación del biocarbón como material para la mejora del suelo (Arbaz, 2011).

**2.2.5 Interacciones biocarbón-microorganismos.** La incorporación de biocarbón al suelo induce el desarrollo de una mayor diversidad de microorganismos. Aumento de la respiración basal del suelo, mayor diversidad y crecimiento de las poblaciones de bacterias en suelos tratados con carbón vegetal en varios estudios. Estos suelos estimularon la colonización por micorrizas, el gran número de poros del biocarbón constituyeron un hábitat de calidad para estos organismos.

También, se demostró efectos positivos sobre otros microorganismos benéficos como *Rhizobium* sp., *Trichoderma* spp., y otras bacterias implicadas en la promoción del crecimiento e inducción de resistencia (como los actinomicetes entre otros). Además, se sugiere que ciertas sustancias del proceso de pirólisis que se encuentran en la superficie del biocarbón (como el ácido acético, ácido fórmico, los formaldehidos, el metanol y xyacetaldéhididos), que en grandes cantidades pueden tener efectos biocidas, sirven de sustrato (cantidades menores) de carbono y energía para los microorganismos (Henreaux, 2012).

**2.2.6 Efectos sobre suelos y plantas.** En este aspecto, la bibliografía contiene numerosas publicaciones acerca de los posibles efectos de la aplicación del biochar sobre el ecosistema edáfico. No obstante, el grado de conocimiento es muy reciente, y a menudo los resultados son muy variables y dependientes del tipo de estudio (Sohi *et al.*, 2009).

Una de las ventajas del uso del biochar como enmienda del suelo es que el C puede ser almacenado durante cientos de años, dada la estabilidad del biochar, mejorando el crecimiento de las plantas y el secuestro de carbono en el suelo (Lehmann *et al.*, 2006). No obstante, se ha encontrado que existe otra fracción del biochar que no sería estable a largo plazo (Sohi, *et al.*, 2009), de este modo se ha sugerido que el biochar estaría formado por componentes estables y otros que en cambio, serían degradables.

Faltan estudios que investiguen acerca de la estabilidad del biochar a corto y largo plazo bajo suelos y climas diferentes. Las condiciones de combustión, así como las características de la materia prima utilizada en la producción de biochar, serían los aspectos que determinarían la proporción de componentes relativamente lábiles en el biochar, sin olvidar los objetivos principales que se planteen para el proceso de pirólisis: obtención de energía o biochar, ya que también, influiría sobre la estabilidad del biochar producido al ser éste de diferentes características en función del tipo de pirólisis (Sohi, *et al.*, 2009).

Otros aspectos estudiados son el aumento de la disponibilidad de nutrientes para las plantas en parte por la mejora de la capacidad de intercambio catiónico en el suelo (CIC), así como la estimulación de los procesos biológicos que permiten mejorar la estructura del suelo y la

capacidad de almacenamiento de agua (Fowles, 2007, Glaser, *et al.*, 2000). Dichos estudios también hablan de la capacidad de este material para reducir la lixiviación y la escorrentía superficial, aumentar el pH del suelo, así como la absorción de pesticidas y metales pesados (Major, 2010).

Atendiendo al efecto de enmienda orgánica que produce la aplicación del biochar en suelos, la reducción en la densidad aparente y el aumento de materia orgánica permitirían reducir el laboreo mecánico. Además, se reducirían costos en irrigación, debido al aumento en la capacidad de retención de agua. En este sentido, Glaser (2002), encontró en suelos de terra preta una capacidad de retención de agua superior en un 18% en comparación a los suelos adyacentes.

En cuanto a beneficios en la producción y requerimiento de nutrientes, se ha encontrado que el biochar permite obtener igual rendimiento de cosecha con una dosis más baja de fertilización que aquellos cultivos en los cuales se aplica la dosis óptima de fertilización (Sohi *et al.*, 2009). Se ha sugerido que el objetivo de aplicación de biochar en suelos de cultivos no sería tanto para aumentar la producción, sino más bien para asegurar un equilibrio de las cosechas, frente a eventos climáticos como por ejemplo sequías. Lehmann y Rondon (2006), encontraron incrementos en la absorción por plantas de P, K, Ca, Zn y Cu en cultivos tropicales en los cuales se había aplicado biochar. La naturaleza y el mecanismo básico que explique las interacciones entre cosecha, tipo de suelo, tipo de materia prima para la producción de biochar, método de pirólisis y dosis de aplicación tiene que ser ampliamente estudiado para ganar capacidad de predicción en la aplicación de biochar en suelos y, abrir la posibilidad de aplicación a escalas más amplias. Asimismo, optimiza la dinámica de los nutrientes.

De acuerdo a Van Zwieten (2009), la microactividad del suelo aumenta, favoreciendo la creación del humus. También, mejora la fijación de metales pesados y pesticidas, la estabilización de la materia orgánica y el impacto de gases nocivos para el medioambiente se reduce. Gracias a todas estas propiedades tan numerosas y positivas, se considera que la utilización de biocarbón es prometedora para una mejora sostenible del suelo. Ningún estudio publicado hasta ahora, ha podido demostrar que el suelo sufriera perjuicio alguno por utilizar biocarbón. Teniendo en cuenta el comprobado aumento de actividad en suelos en los que se ha añadido biocarbón, y

según todos los estudios realizados, se puede decir que en comparación el potencial de peligro que pudiera presentar este material resulta muy bajo.

**2.2.7 Cantidades a aplicar.** El biocarbón se suele utilizar una sola vez, con la finalidad de mejorar la estructura física y orgánica del suelo. Las cantidades dependen del suelo y el cultivo. Siguiendo el consenso científico actual, se hablan de cantidades entre 10 -20 toneladas de biocarbón por hectárea, recomendadas como aplicación única. En las pruebas científicas se aumentaron estas cantidades hasta 140 t por hectárea sin que ni el suelo ni el cultivo se resintieran por ello. Sin embargo, para evitar riesgos lo mejor es moderar las cantidades y no utilizar tantas (Arbaz, 2011).

**2.2.8 Equilibrio de nutrientes y lixiviación.** El biocarbón se compone principalmente del carbono mineralizado (> 50%) que permanece en el suelo por un período de 1000-2000 años, según las condiciones predominantes de este, y ni se degrada ni se erosiona. El biocarbón además, contiene la mayoría de los nutrientes que la biomasa contiene en su forma original y pirolizada. A causa de su elevada potencia de adsorción, estos elementos resultan muy limitados en cuanto a su disponibilidad en las plantas. Así, explica Yin Chan (2009), citado por Arbaz (2011), según sea el carbón y la biomasa, solo un 1% del nitrógeno contenido y aproximadamente un 15% de fósforo están disponibles para las plantas. Por lo tanto, el efecto real de abono del biocarbón es extremadamente pequeño. El aumento de crecimiento de biomasa que suele observarse una vez aplicado el biocarbón, hay que achacarlo a mejoras del suelo de orden físico y bioquímico, antes que al efecto de los abonos minerales.

El aumento de la relación C:N de los suelos ocasionado por la aplicación de biocarbón genera una mayor concentración en carbono de la planta, principalmente en forma de lignina y celulosa, que forman una barrera que afecta a la capacidad de succión y la fertilidad de las plagas, así como la modificación de compuestos contenidos en la savia, podría influir sobre la resistencia de las plantas contra plagas y enfermedades. Se demostró que la aplicación de cantidades importantes de nitrógeno tienden a provocar la disminución de la espesura de la cutícula de las plantas, facilitando la nutrición de las plagas como la mosca blanca (*Bemisia tabaci*) y el pulgón (*Myzus persicae*) cuyas poblaciones suelen aumentar (Henreaux, 2012).

Dos propiedades del biocarbón podrían influir sobre este mecanismo:

- Su alta retención de nutrientes, particularmente del nitrógeno, que permite disminuir las aplicaciones y así evitar una sobredosis de este mismo elemento.
- El aumento de las concentraciones en carbono del suelo, resultado de la composición del material y de la liberación de compuestos. Los grupos carboxilos, presentes en la superficie del biocarbón, aumentan la concentración del carbono de las plantas y favorecen la producción de lignina y celulosa.

El biocarbón ralentiza de forma evidente la degradación tanto de los nutrientes como de los metales pesados. La presencia de biocarbón en el suelo reduce de forma evidente la degradación de los fosfatos (véase la gráfica) y de los nitratos. (Arbaz, 2011).

**2.2.9 Esparcimiento de la mezcla.** Si se utiliza biocarbón puro en el suelo, puede bloquear los nutrientes del suelo, debido a su alto poder y propiedades de adsorción. Por este motivo, lo más indicado es mezclar el biocarbón con compostaje u otros nutrientes orgánicos para suelos, como los abonos. Por otra parte, el biocarbón también, podría considerarse como material auxiliar del compostaje y, autorizarse como tal. Añadir biocarbón al compostaje aumenta su eficiencia nutriente y reduce la emisión de gases en la atmósfera (Arbaz, 2011).

Por otra parte, la interacción del biochar con los fertilizantes, así como los efectos sobre la biota del suelo y sus implicaciones sobre la ecología del mismo son factores todavía poco conocidos y en este sentido, la investigación de los efectos de la aplicación del biochar en suelos es reciente (Lehmann, *et al.*, 2011). Las investigaciones al respecto están orientadas al estudio de la estructura física del biochar y las interacciones con microorganismos, como las micorrizas, si bien se ha encontrado variabilidad en los resultados. Algunos estudios han encontrado incrementos de la actividad microbiana en suelos enriquecidos con biochar (Steiner, *et al.*, 2008).

El estudio hace referencia a la capacidad del biochar, debido a su estructura en microporos, para permitir el establecimiento de colonias microbianas. No obstante, se ha discutido que la biomasa microbiana no es una buena medida de la actividad de la misma, lo cual genera incertidumbre en la valoración de los efectos del biochar, debido a la falta de conocimiento en cuanto a que tipo de

comunidad microbiana puede verse favorecida, y lo que es más importante, el tipo de actividad que puedan realizar en el ecosistema edáfico.

Para realizar una aplicación de biocarbón debe considerarse el tipo de suelo, las prácticas de cultivo, el clima, la erodabilidad del suelo, la forma de aplicación al contar o no con una maquinaria, ya sea superficial (0 a 30 cm) en la cual se homogeneiza con el suelo, o la profundidad (> 30 cm) que generalmente se realiza en banda o muy cercanas a las raíces, lo que evita la posibilidad de erosión del suelo. También, el clima debe ser considerado, pues debe aplicarse cuando no hay viento y humedecerlo para evitar pérdidas en el aire. Puede emplearse en forma de perdigones junto con otro tipo de mejoradores como abonos o compostas y las cantidades aplicadas deben estar basadas en resultados experimentados. Dosis de 5 a 50 ton/ha usadas con una gestión correcta de fertilización, dieron efectos positivos sobre el rendimiento de cultivos. Además, no es necesario aplicarlo repetidamente en un cultivo en el caso de abonos o compostas, que su efecto perdura en el suelo debido a su recalcitrancia (Escalante, 2013).

### **2.3 Antecedentes**

Numerosos estudios de los últimos 10 años han demostrado que el biocarbón, sometido a la mayoría de las condiciones investigadas, aumenta la productividad del suelo (Lehmann 2009), (Glaser 2001) y mejora la capacidad de almacenamiento de agua del terreno (Lehmann 2007), (Kuzyakov 2009). Debido a su superficie tan específica (50 – 300 m<sup>2</sup>/g) y a su porosidad, el biocarbón aumenta la capacidad de adsorción del agua y de los nutrientes (Lehmann 2009, Glaser 2001, Pichler 2010).

La reacción de la pirólisis ha sido estudiada por diferentes autores los cuales cita Cobos (2012). En términos generales existen dos tendencias en modelos cinéticos de reacción. La primera en la cual se propone un modelo básico con reacciones de primer orden que consideran una simple disociación de la biomasa en componente sólido (biocarbón), líquido (condensable) y gaseoso (no condensable), tal como lo propuso Thunman y Leckner (2002), a partir de la madera.

La segunda tendencia sigue el modelo propuesto por Broido y Shavizadesh (1994), en el cual se formuló un esquema para la celulosa donde se produce un componente activo inicial a partir del

cual se obtienen los componentes sólidos y gaseosos. Millar y Bellan (1997), retoman este modelo adicionando una reacción de segundo orden en la formación de gas a partir de los productos condensables, en este modelo cinético el término  $V_{sol}$  se introduce como un factor experimental para la formación del sólido. Diebold J.D. (1997), realizó un análisis del proceso de pirólisis por ablación, a partir del modelo de Broido y Shavizadesh, para justificar la existencia de una sustancia inicial activa y propone la reacción de pirólisis de biomasa como un proceso de fusión de la misma, en el cual la biomasa sólida cambia a un estado líquido o sustancia activa (Cobos, 2012).

Por lo general, el biochar aumenta la productividad y calidad del suelo, sobre todo en suelos ácidos y pobres en nutrientes, como por ejemplo los oxisoles. En la revisión de Sohi *et al.* (2009), se muestran 13 estudios de diferentes autores en los que se obtienen incrementos de productividad en los diferentes cultivos realizados. Tres son los mecanismos propuestos que tratan de explicar cómo el biochar permite aumentar la producción en cosechas: por la modificación directa de la química del suelo debido a la composición del biochar, está formado por superficies químicamente activas que permiten modificar la dinámica de los nutrientes en el suelo o bien catalizan reacciones útiles para la obtención de un suelo fértil, modifica físicamente el suelo de manera que beneficia el crecimiento de las raíces y aumenta la retención de agua y nutrientes (Sohi, *et al.*, 2009).

Escalante (2013), utilizó cuatro biocarbones generados de rastrojo de maíz procesado con diferentes tamaños de partículas y pirolizados artesanalmente a dos temperaturas. Las características físicas y químicas de los biocarbones producidos fueron diferentes. Los materiales generados no provocaron fitotoxicidad y cuando aplicados a un cultivo de *Lolium perenne* en diferentes dosis (0 a 20 ton/ha) no mostraron efecto negativo. Se observó que en fertilización inorgánica aumentó ligeramente la concentración de fósforo, la respuesta de potasio en condiciones de invernadero fue mínima y no se espera que ésta ocurra en condiciones de campo. Por lo que el autor concluye que se debe realizar estudios mas profundos sobre las características de los biocarbones y su efecto en la nutrición de los cultivos.

Se han realizado diferentes investigaciones respecto al uso de biocarbón y principalmente respecto a las dosis utilizadas tal es el caso de Altamirano, C. Calderón, C. Diez y, M.C. Gallardo, F. (2013), quienes en la investigación denominada Uso de biocarbón proveniente de una caldera de biomasa en el cultivo de maíz en un Andisol en el sur de Chile, realizaron aplicaciones de biocarbón en el cultivo de maíz, aplicando entre 1 y 5 ton/ha utilizando como materia prima *Pinus radiata*, además se utilizó un testigo absoluto donde no existió aplicación de biocarbón. Los suelos son Andisoles de la serie Freire y de textura media. De acuerdo a los resultados obtenidos se determinó que en suelos donde hubo aplicación existió mayor nivel de pH y materia orgánica, mayor disponibilidad de macronutrientes y micronutrientes como fósforo, el crecimiento de plantas aumentó con el aumento de dosis de biocarbón (5 ton/ha). Sin embargo, recomiendan que estos rendimientos podría ser mejor con mayores dosis de biocarbón.

Córdoba, *et al.*, (2002), citado por Aker, C. Soto, G. Imbach, A. Castillo, X. y Garro, F. (2015), establece que en el cultivo de maíz a demostrado mejorar los rendimientos con el paso del tiempo, donde aplicaciones de 20 ton/ha de biocarbón señala tendencias a incrementar los rendimientos sobretodo en suelos oxidados, llegando incluso a incrementar la absorción de N hasta 15% aprovechando los nutrientes. Aker, *et. al.*, (2015), realizaron una investigación denominada efecto de la aplicación de biocarbón, gallinaza y fertilizantes sintéticos en la retención de humedad y otras características de suelo en rendimiento de maíz (*Zea mays*), en tres textura de suelo en León, Nicaragua, aplicaron dosis de 15 ton/ha. Llegando a la conclusión que dichas aplicaciones en un solo ciclo de cultivo de maíz NB-6 mejora los rendimientos y las propiedades fisico-químicas de los suelos con texturas Franco Arenoso, Arenoso Franco y Franco Arcillo Arenoso, aumentando la capacidad de retención de humedad del suelo y disminuye a su vez la densidad aparente del mismo, incrementa el nivel de pH del suelo, aumenta el contenido de bases intercambiables: calcio, magnesio y potasio y su aplicación con gallinaza mejora la disponibilidad de fósforo y nitrógeno en el suelo y mejora el desarrollo radicular de las plantas de maíz y aumenta la producción de biomasa, producción de mazorcas y mejora los rendimientos por hectarea.

Major, *et al.*, (2010), citado por Aker, *et al.*, (2015), también realizó aplicaciones de biocarbón y evaluó el efecto de 3 dosis de biocarbón a lo largo de 4 años en cultivo de maíz, encontrando

efectos significativamente aditivos cada año en términos de rendimiento y biomasa de las plantas. La aplicación de dosis de 20 ton/ha durante el primer año de cultivo obtuvo mayores rendimientos comparado con el testigo, Zhang, *et al.*, (2011), citado por Aker, *et al.*, (2015), reporta que aplicaciones bajas de 2.6 ton/ha presenta incremento en el aprovechamiento del nitrógeno incluso mejor que el maíz aplicado solo con fertilizantes y sin biocarbón pero que al aplicar dosis superiores a 26 ton/ha disminuye rendimientos y contenido de N absorbido por la planta.

Respecto al uso de diferentes fuentes de material vegetal para la elaboración de biocarbón Alcañiz (2012), en su investigación titulada Evaluación de efectos de varios tipos de biochar en suelo y planta, utilizó astillas de pino (*Pinus radiata*), astillas de chopo (*Populus nigra*) y lodos provenientes de EDAR El Prat del Llobregat, Barcelona. Determinó que el uso de diferentes fuentes vegetales producen efectos diferentes en las plantas, sobretodo en maíz, aduciendo que posiblemente el efecto sea resultado de la composición química del material utilizado, dando como resultado mayor absorción de nutrientes, rendimientos y beneficios.

Sohi (2009), realizó diferentes pruebas en materiales vegetales y estableció que respecto al uso del biocarbón si hay un aumento en la productividad y mejora en el suelo y en el caso de priorizar la obtención de biocarbón “biochar” el material de partida (de origen) condiciona alguna de sus características como el contenido de macro y micronutrientes, la estructura física del suelo, capacidad de retención de agua, etc. Razón por la cual es de suma importancia para los efectos que el biocarbón pueda tener al ser aplicado como enmienda de suelos.

### 3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

#### 3.1 Definición y justificación del trabajo

El tomate es uno de los cultivos de mayor importancia en Coatepeque, de acuerdo a varios productores de Aldea Las Palmas y Santa María El Naranjo este cultivo conjuntamente con maíz, frijol y ajonjolí se convierte en uno de los cultivos de mayor relevancia por la frecuencia.

Muchos productores de la zona obtienen bajos rendimientos (menos de 36 ton/ha) en el cultivo de tomate, aunado a los altos costos del fertilizante y la aparición de plagas así como enfermedades producidos por la no incorporación de restos vegetales de cosechas anteriores. Los cultivos como ajonjolí, cascarilla de arroz, rastrojo y olote de maíz por carecer de aperos de labranza hace que se busquen alternativas que puedan ayudar a mejorar el rendimiento y aprovechar los restos de cosecha de los otros cultivos que producen.

De acuerdo a Simmons, Tárano y Pinto (1959), los suelos donde se realizó la investigación pertenece a los suelos del litoral del pacífico, de la serie Tiquisate y son de textura franco arenoso. Sin embargo, debido al exhausto uso y al mal manejo de conservación de suelos se han perdido los horizontes mas fértiles por lo tanto la capacidad de intercambio catiónico, retención de nutrientes son bajos y posiblemente los bajos rendimientos pueden ser consecuencia de ello.

El biocarbón obtenido por la pirolisis de material vegetal aumenta la capacidad de fijación e intercambio en la biodisponibilidad de nutrientes (impide lixiviación), mejora las características físicas y químicas del suelo, ayuda en la captura de CO<sub>2</sub> que de otra forma contribuye al efecto invernadero que indica Lehmann (2014).

El biocarbón también presenta beneficios al suelo tales como aumento de la disponibilidad de nutrientes para las plantas en parte por la mejora de la capacidad de intercambio catiónico en el suelo (CIC), así como la estimulación de los procesos biológicos que permiten mejorar la estructura del suelo y la capacidad de almacenamiento de agua, también se menciona la capacidad de este material para reducir la lixiviación y la escorrentía superficial, aumentar el pH del suelo, así como la absorción de pesticidas y metales pesados (Abenza 2012). Además Agricultures (2016), afirma

que este también mejora el sistema radicular de las plantas a través de una respuesta fisiológica que obliga a producir raíces mas finas y largas para llegar a los nutrientes, mejorando así la absorción de nutrientes y reducción de fertilizantes.

De acuerdo a Escalante (2013), el tipo de materia prima utilizada para la elaboración de biocarbón influye en la calidad y por lo tanto en el rendimiento de los cultivos. El biocarbón es un tema que genera mucha expectativa en la agricultura mundial y a pesar de que existen diversas investigaciones que determinan que 20 ton/ha es la mejor dosis a utilizar, no existe suficiente información del tipo de material utilizado para la producción de biocarbón. Sohi *et. al.*, (2009), establece que el tipo de material para producir biocarbón condiciona la calidad y esto concuerda con lo planteado por Alcañiz (2012), quien obtuvo distintos efectos en suelo y plantas utilizando diferentes materiales para la elaboración.

Utilizar los restos de cosecha de otros cultivos para mejorar los rendimientos del cultivo de tomate se vuelve una necesidad en la zona, evaluar el efecto de diferentes materiales de biocarbón en el rendimiento generaría información valiosa para los productores, quienes podrían aprovechar residuos orgánicos para aumentar la fertilidad de sus suelos y la eficiencia de los fertilizantes, orgánicos o sintéticos, que aplican. Así podrían aumentar sus rendimientos sin tener que aumentar su compra de factores de producción externos.

## **4. OBJETIVOS**

### **4.1 General**

Evaluar el uso de materiales vegetales para la elaboración de biocarbón y su efecto en el rendimiento del cultivo de tomate, Coatepeque, Quetzaltenango.

### **4.2 Específicos**

Describir el efecto de cuatro materiales vegetales para la elaboración de biocarbón en la fertilidad del suelo.

Determinar el efecto del uso de biocarbón en los días a floración en el cultivo de tomate utilizando diversas especies vegetales.

Estimar el efecto del uso de biocarbón en los días a cosecha en el cultivo de tomate utilizando diversas especies vegetales.

Calcular el rendimiento (kg/ha) del cultivo de tomate utilizando diferentes fuentes de especies vegetales para la elaboración de biocarbón.

Cuantificar el volumen de la raíz y el efecto del biocarbón de diferentes materiales vegetales en el cultivo de tomate.

Establecer el área correspondiente a la cantidad de material vegetal a utilizar para la elaboración de biocarbón.

Estimar la rentabilidad del cultivo de tomate utilizando diferentes fuentes vegetales en la elaboración de biocarbón.

## **5. HIPÓTESIS**

### **5.1 Hipótesis alterna**

- Al menos uno de los materiales vegetales utilizar para la elaboración de biocarbón mostrará diferencia significativa en las variables fertilidad del suelo, días a floración, días a cosecha, rendimiento y volumen de la raíz en el cultivo de tomate, Coatepeque, Quetzaltenango.

## **6. METODOLOGÍA**

### **6.1 Localización**

La investigación se realizó en Hacienda Gracias a Dios, la cual se encuentra ubicada en Aldea Santa María El Naranjo, las coordenadas geográficas latitud 14°40'34" y longitud 92°04'16" a 8 km noreste al entronque con la carretera Internacional del Pacífico CA-2 ubicado en el km 238.

De acuerdo a Simmons, Tárano y Pinto (1959), los suelos donde se realizó la investigación pertenece a los suelos del litoral del pacífico perteneciente a la serie Tiquisate.

Según Holdridge (1978), citado por Pérez (2012), la zona de vida del lugar donde se realizó la investigación es bosque muy húmedo subtropical cálido bmh-S (c).

### **6.2 Material experimental**

El material experimental que se utilizó fue rastrojo y olote de maíz proveniente de las cosechas realizadas por los productores de la zona, además, se utilizó restos de ajonjolí y cascarilla de arroz el cual se debe secar por espacio de 30 días, para que pierda la humedad y pueda ser transformado posteriormente en el proceso de pirólisis.

Se utilizó la variedad Helios por ser la mas comercializada en la región donde se realizó la investigación.

### **6.3 Factores a estudiar**

El factor que se estudió en la investigación fueron los cuatro materiales vegetales que se utilizaron para la obtención de biocarbón.

### **6.4 Descripción de los tratamientos**

Los tratamientos que se utilizaron fueron los diferentes materiales vegetales utilizados para la obtención de biocarbón y evaluar su efecto en la productividad del cultivo de tomate para un total de 5 tratamientos, estos fueron:

**Cuadro 4.**

*Tratamientos utilizados en la investigación.*

<b>Tratamiento</b>	<b>Material vegetal</b>
T1	Testigo Absoluto
T2	Rastrojo de Maíz
T3	Olote de Maíz
T4	Rastrojo de Ajonjolí
T5	Cascarilla de Arroz

De acuerdo a los antecedentes descritos anteriormente, las dosis recomendadas no deben superar las 20 ton/ha para evitar resultados adversos, razón por la cual se utilizará dicha dosis en la presente investigación.

**6.5 Diseño experimental**

Se realizaron 5 tratamientos y 4 repeticiones en un diseño de bloques completos al azar para un total de 20 unidades experimentales.

**6.6 Modelo estadístico**

El modelo estadístico utilizado es el propuesto por Sitún (2005), quien establece que:  $Y_{ij} = U + T_i + B_j + E_{ij}$

Donde la variable  $Y_{ij}$  está en función de:

$U$ = La media general de la variable de respuesta a evaluar.

$T_i$ = El efecto del  $i$ -ésimo nivel de los diferentes tratamientos a utilizar.

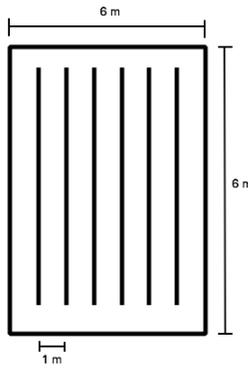
$B_j$ = El efecto del  $j$ -ésimo bloque o repetición.

$E_{ij}$ = Error experimental asociado a la  $i$ - $j$ -ésima unidad experimental.

**6.7 Unidad experimental**

Cada una de las unidades experimentales estuvieron constituida de seis surcos con una longitud de 6 m, los cuales estuvieron distanciados a 1 m entre si y, cada una de las plantas distanciadas a 0.50 m en cada uno de los surcos.

El área total de cada unidad experimental fue de 36m<sup>2</sup>. La parcela neta consistió en 4 surcos centrales a los cuales se les eliminó 1m en cada extremo, para evitar el efecto de borde. El área total de la parcela neta fue de 12 m<sup>2</sup>, para un total de 32 unidades observacionales por unidad experimental.



*Figura 1.* Unidad experimental a utilizar en la investigación.

## 6.8 Croquis de campo

El croquis de campo utilizado en la investigación fue:

R1	T1	T3	T2	T5	T4
R2	T3	T2	T1	T5	T4
R3	T4	T5	T1	T2	T3
R4	T2	T1	T4	T3	T5

*Figura 2.* Croquis de campo de la investigación.

## 6.9 Manejo del experimento

**6.9.1 Muestreo de suelo.** Respecto al muestreo de suelo se realizó uno al finalizar la cosecha anterior, para ello se hizo una obtención de muestras al azar en forma de zig-zag en todo el terreno y posteriormente se envió a los laboratorios de ANALAB.

El procedimiento a realizar fue el siguiente:

- a. Se realizó un muestreo antes de iniciar la investigación y se realizaron 5 muestreos una vez concluida la investigación (uno por cada tratamiento).
- b. Para lo anterior se delimitó el área total de la investigación respecto al muestreo inicial y se tomaron 10 submuestras aleatorias en todo el terreno las cuales se colocaron dentro de un recipiente plástico limpio y libre de impurezas.
- c. Respecto a las 5 muestras que se tomaron para su análisis respectivo, se identificaron las unidades experimentales (cuatro) correspondientes a cada tratamiento, se tomó una submuestra por cada unidad experimental de cada tratamiento, se colocaron en distintos recipientes (uno por tratamiento) y se homogenizó la muestra, para obtener una libra por muestra de cada tratamiento.
- d. Para la obtención de las submuestras, se limpió el área donde se colectaron dichas submuestras y con una pala se realizó la limpieza de la superficie del suelo, posteriormente se abrió un agujero en forma de V y se realizó un corte transversal en uno de los costados, se removió aproximadamente 0.10 m de grosor del corte en la parte superior y en los costados para obtener una fracción de suelo correspondiente a los 0.20 a 0.35 m, donde se encuentran las mayorías de raíces del cultivo de tomate.
- e. Luego se colocaron en recipientes plásticos previamente identificados, como se describe en el inciso c y se procedió a tamizar la muestra obtenida para eliminar todos aquellos materiales correspondientes a diámetros mayores a 4 mm.
- f. Luego de tamizar las muestras se pesó y se colocó una libra en bolsas con su respectiva etiqueta, la cual incluyó la siguiente información:
  - Tratamiento.
  - Fecha de muestreo.
  - Localización del lugar.

- Coordenadas geográficas.
- Nombre del propietario.
- Número de teléfono.
- Especificaciones del cultivo.
- Especificaciones de la zona donde se tomó la muestra (calle, entre las plantas, etc).

g. Posteriormente a ello se enviaron las muestras a los laboratorios de ANALAB en la ciudad de Guatemala.

**6.9.2 Preparación del terreno.** Se realizó un paso de arado 20 días antes del trasplante con un disco de 28 pulgadas de diámetro y 7 días después de que se realizó la mecanización con arado se realizó un paso de rastra, utilizando una rastra integral de 28 discos de 18 pulgadas de diámetro.

**6.9.3 Elaboración de surcos.** Un día antes del trasplante se realizó el trazado de los surcos, trazo de bloques y unidades experimentalmente, finalmente se aplicó un riego profundo.

**6.9.4 Instalación de riego.** Se utilizó un sistema de riego por goteo, se colocó el ramal primario y los ramales secundarios a una profundidad de 0.35 m, estos se colocaron después de realizar todas las labores de mecanización.

**6.9.5 Trasplante.** Se trasplantaron plántulas (pilones) de tomate de 30 días de germinación. Se utilizaron macanas para perforar los agujeros, luego se colocarán los pilones en los agujeros y por último se compactó la tierra alrededor de las plántulas.

**6.9.6 Tutorado.** Se utilizó un tutorado para darle soporte a las plantas, con soportes de madera (bambú) de 0.10 m de diámetro, estos se distribuyeron uniformemente en toda la hilera. Se colocaron cintas de polietileno para darle soporte a las plantas con tres hileras a 0.2 m de altura desde el suelo para arriba, colocaron conforme la planta fue creciendo.

**6.9.7 Control de malezas.** El control de malezas se realizó en forma manual, utilizando azadón y machete, además como control químico se utilizó el herbicida fluazifop-p-butil a razón de 75 cc/bomba de mochila de 16 litros de agua, realizándose 3 aplicaciones a los 15, 30 y 40 días de haberse realizado el trasplante.

**6.9.8 Fertilización.** Se realizó de acuerdo al plan que utilizan los productores de la zona, siendo los fertilizantes a utilizar los siguientes:

**Cuadro 5.**

*Plan de fertilización.*

<b>Fertilizante</b>	<b>Cantidad (kg/ha)</b>	<b>g/planta</b>	<b>Fecha de aplicación (Días después del trasplante)</b>
10-50-0	522	26	8, 18
46-0-0	60	3	28, 49
18-46-0	80	4	28, 49

**6.9.9 Plan fitosanitario.** Para el control de plagas, enfermedades, bacterias y ácaros se usaron productos que son de fácil disponibilidad para los productores de la zona, siendo estos:

**Cuadro 6.**

*Productos químicos utilizados para el control de insectos dañinos.*

<b>Ingrediente activo</b>	<b>Dosis/16 L</b>	<b>Aplicación ( ddt*)</b>
Thiamethoxam	12 g	Al momento
Alpha-cypermethrin	12 cc	9, 13, 17
Tiametoxan	7 cc	22, 36
Lambdacialotrina	25 g	27, 37
Acephato	50 cc	32, 43
Oxamil + Lufenuron	2 cc	50, 70

\*ddt= días después del trasplante.

**Cuadro 7.***Fungicidas al suelo a utilizados en la investigación.*

<b>Ingrediente activo</b>	<b>Patógeno que controla</b>	<b>Dosis/16 L</b>	<b>Aplicación ( ddt*)</b>
Procloraz	Alternaria sp.	50 g	1
Captan	Tizón tardío	100 g	8, 24
Pentaclorobenzeno			
Carbendazim	Sclerotinia Sp	25 cc	16

\*ddt= días después del trasplante.

**Cuadro 8.***Fungicidas foliares que se utilizaron en el manejo del experimento*

<b>Ingrediente activo</b>	<b>Dosis/16 L</b>	<b>Aplicación ( ddt*)</b>
Etilenbisditio	125 g	5,10, 15, 20, 25
Carbamato	125 g	30, 47
Manganeso+zinc+ Metalaxict + Mancozeb	12 cc	37, 57
Bitertanol 25%	100 g	43, 64
Carbendazim Azoxystrobin	12 g	50, 70

\*ddt= días después del trasplante.

**Cuadro 9.***Acaricidas y bactericidas utilizados durante el manejo del experimento*

<b>Ingrediente activo</b>	<b>Dosis cc/16 L</b>	<b>Aplicación ( ddt*)</b>
Abamectina	5	8,32
Azufre	125	16, 41
Dicofol	12	24, 50
Oxitetraciclina-gentamisina	50	1, 9, 18, 26, 34, 42, 50

**6.9.10 Aplicación de productos químicos.** Para la aplicación de productos químicos se utilizó una bomba de mochila de 16 L y se realizará la aplicación de forma uniforme de acuerdo al producto a utilizar.

**6.9.11 Elaboración de biocarbón.** Para la elaboración de biocarbón se utilizó un horno tipo cilindro el cual permite realizar la reacción de combustión en presencia de cantidades mínimas de oxígeno, además, con este método se obtiene una temperatura superior a los 300 °C. El tiempo que permaneció encendido fue de aproximadamente 60 minutos, hasta que se quemó completamente el material vegetal, mientras que la capacidad fue de 182 kg con una eficiencia del 45%, por lo tanto, se esperó obtener entre 68 a 81 kg de biocarbón.

**6.9.12 Aplicación del biocarbón al suelo.** Antes de iniciar con el trasplante se aplicó el biocarbón esparcido al suelo y luego con ayuda de un azadón se incorporó en la misma, fue necesario distribuirlo de forma correcta y uniforme en las unidades experimentales correspondientes.

## **6.10 Variables de respuesta**

**6.10.1 Análisis de la fertilidad del suelo antes y después de la aplicación de biocarbón.** Para evaluar esta variable se realizaron varios análisis de suelo, el cual incluyó los siguientes parámetros:

- pH.
- Acidez intercambiable (H + Al).
- Materia orgánica.
- Nitrógeno.
- Fosforo.
- Potasio.
- Calcio.
- Magnesio.
- Cobre.
- Hierro.

- Manganeseo.
- Zinc.

Para determinar los nutrientes presentes en el suelo se utilizó Olsen modificado como solución extractora y para determinar fósforo se utilizó KCl obteniendo de esta forma el valor de fósforo disponible.

Respecto al nitrógeno se estimó como el 5% del contenido de materia orgánica de acuerdo a Graetz (1997), citado por Julca, A. Meneses, F. Blas, R. Bello, S (2006), debido a que este elemento no lo incluye el análisis realizado.

**6.10.2. Días a floración.** Para determinar los días a floración se contaron los días desde el momento de siembra hasta que el 50% de las plantas presentó inicio de floración.

**6.10.3. Días a cosecha.** Los días de cosecha se estimaron desde la siembra del cultivo a campo definitivo, hasta el momento que ocurrió el primer corte. Se realizaron tres cortes, sin embargo, para esta variable se tomó en cuenta cuando ocurrió el primer corte.

**6.10.4. Rendimiento (kg/ha).** El rendimiento se estimó luego de haber realizado los tres cortes en el cultivo, posteriormente se estimó la cosecha en kg/ha.

**6.10.5 Volumen de raíces (cm<sup>3</sup>).** De acuerdo Agricultures (2016), el uso de biocarbón en el suelo mejora el sistema radicular de las plantas a través de una respuesta fisiológica que obliga a producir raíces más finas y largas para llegar a los nutrientes. Es por ello, que se evaluará si existe un efecto en las raíces por el uso del biocarbón. Para medir dicha variable se utilizó una probeta graduada, luego se cortaron las raíces de la planta de tomate con agua se removió el suelo que se adhirió a ellas, se introdujeron en la probeta y por diferencia de volumen se estimó dicha variable.

**6.10.6 Área correspondiente a la cantidad de material vegetal a utilizar para elaborar 20 ton de biocarbón.** Esta variable sirvió para determinar el área de cada cultivo de materiales vegetales para producir 20 ton de biocarbón, para ello, se calculó la cantidad de material vegetal a producir y se estimó el área de cultivo para obtener el material vegetal.

**6.10.7 Rentabilidad.** Para poder determinar la rentabilidad de los tratamientos se utilizó la relación beneficio/costo, la cual consistió en calcular todos los costos a los que se incurre y todos los ingresos obtenidos, posteriormente se determinó el índice r b/c y se determinó cual es el mas rentable.

## **6.11 Análisis de la información**

**6.11.1 Análisis estadístico.** Para el análisis estadístico se realizaron los análisis de varianza (ANDEVA) con un nivel del 0.05 utilizando el programa Minitab 16, y cuando hubo significancia estadística se utilizó el comparador de medias de Tukey al 0.05 de significancia estadística.

**6.11.2 Análisis económico.** Para el análisis de rentabilidad se estimaron todos los costos e ingresos de la investigación y, se realizó una proyección de rentabilidad por hectárea utilizando la relación beneficio/costo.

## 7. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 7.1 Análisis de la fertilidad del suelo antes y después de la aplicación de biocarbón

Las muestras de suelos tomadas, se enviaron al laboratorio y posteriormente se recibieron los resultados. Respecto al nitrógeno se estimó como el 5% del contenido de materia orgánica de acuerdo a Graetz (1997) , citado por Julca, A. Meneses, F. Blas, R. Bello, S (2006), debido a que este elemento no se incluyó en el análisis solicitado. Los resultados obtenidos fueron:

**Cuadro 10.**

*Resultado del análisis de suelos de pH, M.O. N, P, K, Ca y Mg.*

Tratamientos	pH	%		mg/L		Cmol(+)/L	
		M.O.	N	P	K	Calcio	Magnesio
Niveles adecuados	5.5-6.8	3 a 6		10 a 20	0.2 a 0.6	4 a 20	1 a 5
Olote de maíz	5.99	3.26	0.16	1.84	0.39	5.43	1.92
Rastrojo de maíz	6.19	3.03	0.15	11.55	0.23	4.65	1.83
Rastrojo de ajonjolí	6.02	2.95	0.14	7.17	0.33	4.53	1.81
Testigo absoluto	5.92	2.76	0.13	2.38	0.12	5.44	1.82
Cascarilla de arroz	5.86	2.68	0.13	7.28	0.18	4.04	1.59
Antes de siembra	6.03	2.56	0.12	7.2	0.22	4.66	1.61

Antes de la siembra el pH era de 6.03, sin embargo el pH cambió a 5.92 después de la siembra, esto posiblemente a que los fertilizantes que se utilizaron acidificaron el suelo, ya que de acuerdo a otros autores el biocarbón tiende a mejorar el pH tal y como lo explica Hendreax (2012), quien indica que la incorporación de biocarbón al suelo aumenta su capacidad de fijación e intercambio de nutrientes impidiendo de esta manera su lixiviación, fenómeno característico de los suelos en los trópicos expuestos a grandes cantidades de precipitación.

Estos cambios están generalmente acompañado de un aumento del pH y una inmovilización de aluminio (Al) de la solución del suelo, proporcionando a las plantas una mayor disponibilidad de nutrientes, lo que optimiza su desarrollo.

Sin embargo, el posible uso de fertilizantes durante la investigación hizo que se acidificara el suelo ya que no hay reportes de investigaciones donde el biocarbón acidifique el suelo. El único tratamiento que aumentó el pH fue el rastrojo de maíz.

Con respecto al contenido de materia orgánica tanto el rastrojo de maíz como el olote de maíz mejoraron la presencia de materia orgánica, mientras que la cascarilla de arroz presentó niveles inferiores de materia orgánica con respecto al testigo absoluto. El aumento de materia orgánica en el testigo absoluto se debe a la incorporación de materia orgánica que se hizo al momento de realizar la investigación.

Con respecto a Nitrógeno tanto el olote de maíz como el rastrojo presentaron mayores contenidos, aunque este está ligada la presencia de materia orgánica presente en el suelo. El rastrojo de maíz es el único que presenta niveles de fósforo adecuado (11.55 mg/L) y todos los demás están por debajo del nivel deseado (10 mg/L). Con respecto al K únicamente el rastrojo de ajonjolí y el olote de maíz presentan valores óptimos, mientras que los demás tratamientos están por debajo de lo adecuado, esto posiblemente hizo que el olote de maíz presente mejores resultados en el rendimiento pues es quien obtuvo la mayor cantidad de potasio en el suelo.

Con respecto a calcio y magnesio, todos presentaron niveles adecuados siendo el testigo absoluto y el olote de maíz quienes obtuvieron los mayores niveles, siendo estos superiores al valor obtenido previo a la investigación. Se puede establecer que aumenta la disponibilidad de Ca la aplicación de biocarbón de olote de maíz. Lo mismo ocurre con el Mg el uso de biocarbón de olote de maíz, mejora la disponibilidad del mismo, esto concuerda con Hendreaux (2012), quien aduce que la disponibilidad de magnesio y calcio se debe a la ausencia de lixiviación por efecto del biocarbón.

**Cuadro 11.***Niveles de acidez intercambiable, Fe, Mn, Zn y B por tratamiento.*

Tratamientos	Cmol/(+)/L				
	AI	Fe	Mn	Zn	B
<b>Niveles adecuados</b>	<b>0 a 1.2</b>	<b>20 a 150</b>	<b>8 a 80</b>	<b>0.2 a 2</b>	<b>1 a 5</b>
Olote de maíz	0.08	37.38	96.02	1.75	0.06
Rastrojo de maíz	0.11	49.96	54.44	2.78	0.36
Rastrojo de ajonjolí	0.10	48.06	69.94	2.59	0.02
Testigo absoluto	0.11	26.56	98.3	1.18	0.31
Cascarilla de arroz	0.11	51.98	78.6	2.5	0.33
antes de siembra	0.10	64.04	61.82	2.31	0.01

Los niveles de ácidéz intercambiable fueron menores en olote de maíz (0.08 Cmol/(+)/L), mientras que tanto el testigo absoluto como antes de la siembra los valores fueron de 0.11 y 0.10 Cmol/(+)/L. Respecto a hierro los niveles bajaron en todos los tratamientos, esto es porque antes de la siembra había 64.04 mg/L, mientras que después de la siembra todos los tratamientos están por debajo. Sin embargo, el biocarbón hizo que no bajara de forma significativa ya que el testigo reporta un valor de 26.56 mg/L mientras que los demás tratamientos tienen valores superiores.

Respecto al manganeso se puede observar que el testigo absoluto presenta valores mayores que los demás, por lo que se puede establecer que el biocarbón no ayuda a la retención de este elemento, siendo olote de maíz el tratamiento que presentó el segundo valor más alto. El rastrojo es importante en la presencia de zinc, ya que tanto rastrojo de maíz como ajonjolí presentaron los mayores niveles de zinc por encima de lo que había antes de la siembra. Con respecto a boro, el tratamiento de rastrojo de maíz fue quien presentó mayores resultados, pues este fue que manejo 0.36 mg/L, valores muy superiores a 0.01 mg/L reportados antes de la siembra.

A pesar de que Hendreaux (2012), establece que los suelos sometidos a la aplicación de biocarbón presentan una mayor fijación y disponibilidad de macronutrientes y micronutrientes como el fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), zinc (Zn), cobre (Cu), boro (B) y molibdeno (Mo) asociada con una mayor retención (y entonces menor lixiviación) del nitrógeno (N), no todos los

tratamientos demostraron mayores niveles de los mismos, ya que en algunos casos existió una disminución de elementos nutricionales, principalmente en cascarilla de arroz.

Otro valor importante y que define la fertilidad de los suelos es la capacidad de intercambio catiónico, el cual se obtuvo del análisis de suelo realizado. Los resultados se presentan a continuación:

**Cuadro 12.**

*Capacidad de intercambio catiónica efectiva por tratamiento.*

Tratamientos	CICe (Cmol(+)/L)
	5 a 25
Olote de maíz	7.82
Rastrojo de maíz	6.82
Rastrojo de ajonjolí	6.77
Testigo absoluto	7.49
Cascarilla de arroz	5.92
Antes de siembra	6.59

Como se puede observar, el tratamiento de olote de maíz fue el que presentó mayor CICe, mientras que cascarilla de arroz fue el tratamiento que mostró menor CICe, incluso menor que antes de la siembra, por lo que se puede establecer que la CICe, afecta directamente el rendimiento (kg/a) de los cultivos, ya que olote de maíz fue quien presentó mayor rendimiento mientras que cascarilla de arroz fue quien presentó menor CICe.

Lo anterior concuerda por lo descrito por Hendreaux (2012), quien establece que La mayor retención de nutrientes se explica por un incremento de la superficie de intercambio debido a la porosidad del biocarbón, una mayor CIC, un aumento del ratio C:N y una menor pérdida de la materia. Es interesante especificar que el aumento de carbono en el suelo permite un mayor secuestro del nitrógeno, disminuyendo de esta manera la lixiviación y la desnitrificación, fuente de N<sub>2</sub> (gas de efecto invernadero importante), y asegurando la liberación paulatina de este para la planta.

## 7.2 Días a floración

Para la estimación de la variable días a floración se tomó en cuenta desde el día de trasplante hasta que el 50% de las plantas de cada unidad presentó floración. La floración promedio de acuerdo a cada tratamiento evaluado comenzó a observarse a los 53.5 días en algunas unidades experimentales, hasta los 54.25 días, por lo que la floración se presentó de forma uniforme. El promedio de floración por tratamiento fue:

### Cuadro 13.

*Promedio de días de floración por tratamiento.*

<b>Tratamientos</b>	<b>Días a floración</b>
Testigo Absoluto	53.25
Rastrojo de Maíz	54.25
Olote de Maíz	54
Rastrojo de ajonjolí	54
Cascarilla de Arroz	54

De acuerdo a CENTA (sf), las plantas de tomate de crecimiento determinado inician su floración entre los 55 a 60 días después de la siembra, esto concuerda con la investigación ya que los pilones que se trasplantaron a campo definitivo tenían una edad de 20 días, por lo que la floración de la investigación tomando en cuenta los 20 días de edad del pilón osciló entre 53.25 y 54.25 días.

Lo anterior establece que la floración se adelanta en promedio entre 1 y 2 días con relación a lo que establece la literatura (CENTA, sf), siendo este lapso muy corto para establecer una relación directa de influencia entre el uso de biocarbón y la floración, ya que el testigo absoluto fue quien obtuvo menores días a floración (53.25 días) comparado con el resto de los tratamientos con al menos una fuente de biocarbón utilizada en el suelo, se puede establecer que son otros los factores que causan que los días a floración varíen tales como los días exactos de edad de los pilones, fueron establecidos por la empresa distribuidora de los mismos y no por el investigador, o al fotoperiodo de la zona donde se realizó la investigación, ya que la latitud donde se encuentra puede influir en la variación de la floración, tal como lo establece la Universidad de la Empresa

(sf), o posiblemente la variedad utilizada puede que difiera con los días a floración establecidos por CENTA (sf).

Se decidió realizar un análisis de varianza para establecer si la diferencia de días entre los tratamientos es significativa, los resultados se presentan a continuación:

**Cuadro 14.**

*Análisis de varianza de la variable días a floración.*

<b>Fuente</b>	<b>GL</b>	<b>SC Ajust.</b>	<b>MC Ajust.</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
Tratamientos	4	2.300	0.5750	0.55	0.701 <sup>ns</sup>
Repeticiones	3	5.000	1.6667	1.60	0.241 <sup>ns</sup>
Error	12	12.500	1.0417		
Total	19	19.800			

CV: 3.006%

Lo anterior, establece que el coeficiente de variación de la variable fue 3.006%, esto se debe a que todas las unidades observacionales iniciaron floración en un lapso de 2 días por lo que el rango de días no varió, quedando reflejado en el coeficiente de variación anterior.

Con respecto a los bloques o repeticiones se puede observar que no existió diferencia estadística significativa, por lo que se puede establecer que el efecto de los mismos no influyó en los resultados.

Con respecto a los tratamientos se puede observar que tampoco existe diferencia estadística significativa, por lo que se puede establecer que el biocarbón no tiene un efecto directo en los días a floración ni se adelanta o se atrasa la producción de flores si se compara con el testigo absoluto. Esto difiere con algunas investigaciones realizadas por algunos autores quienes reportan efectos positivos y negativos con respecto a los días de floración en distintos cultivos.

Briones (2017), establece que el biocarbón tiene un efecto directo en plantas, ya que realizó aplicaciones de bicarbón en cultivo de Chile Pimiento y observó que aplicando 3750 kg/ha se adelanta los días a floración a 34 días, mientras que sin biocarbón los días a floración fueron de 39 días. Esto no concuerda con los datos obtenidos en la investigación, posiblemente a que el efecto es distinto en cultivo de tomate con respecto a chile pimiento y las fuentes utilizadas son distintas a las del autor por lo tanto las características físico/químicas varían ya que para la investigación de Briones (2017), se usó una mezcla de cascarilla de arroz, estiércol de ganado y restos de poda de cacao.

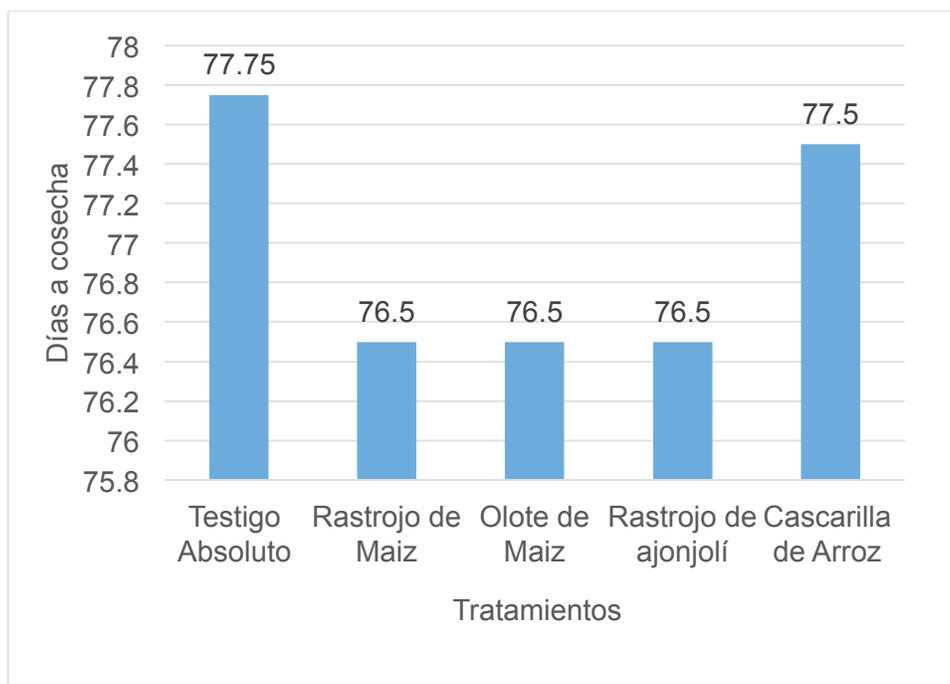
Los resultados obtenidos en la presente investigación, difieren con los resultados obtenidos por Montoya (2016), quien establece que existe un efecto negativo en la floración con la utilización de biocarbón, ya que realizó pruebas con cascarilla de arroz en plantas de arroz y chile jalapeño. Observó que las plantas sometidas a biocarbón demostraron atrasos en la floración, mientras que las plantas que no fueron sometidas a biocarbón.

Ambos autores concuerdan en que el biocarbón mejora la disponibilidad de nutrientes en el suelo lo que repercute en los procesos fisiológicos de las plantas, ya que los efectos son diversos en función del material vegetal utilizado como fuente de biocarbón y el tipo de cultivo a evaluar, por lo cual los resultados de la presente difiere con lo concluido por los dos autores citados con anterioridad.

### **7.3 Días a cosecha**

Los días a cosecha se estimaron en función de los días que transcurrieron desde el momento que se realizó el trasplante, hasta el día que se realizó la primera cosecha. En total se realizaron tres cortes, siendo el primer corte el que mayor rendimiento produjo.

En la zona los agricultores acostumbran realizar entre 2 a 4 cortes, y esto depende principalmente de la uniformidad de la maduración la cual está relacionada con el plan de manejo que se dé al cultivo. La cosecha fue mecanizada tomando en cuenta la presencia de cambio de coloración verde a rojiza en el pericarpio del fruto. A continuación, se presentan los días a cosecha promedio por tratamiento evaluado en la investigación:



**Figura 3.** Días a cosecha en cultivo de tomate utilizando diferentes fuentes de biocarbón.

Los tratamientos que utilizaron para la elaboración de biocarbón, rastrojo de maíz, olote de maíz y rastrojo de ajonjolí fueron los que presentaron en promedio 76.5 días de cosecha, mientras que tanto el testigo absoluto como el tratamiento que utilizó cascarilla de arroz como fuente para la elaboración de biocarbón mostraron 77.75 días a cosecha en promedio.

Los valores anteriores concuerdan por lo establecido por CENTA (sf), los días a cosecha para plantas de tomate con crecimiento determinado oscila entre los 75 a 80 días, por lo tanto, los valores están dentro del rango establecido.

Se realizó un análisis de varianza para establecer si existe o no diferencia estadísticamente significativa, entre los tratamientos evaluados tomando como referencia los días a cosecha. Los resultados obtenidos fueron:

**Cuadro 15.***Análisis de varianza de la variable días a cosecha.*

<b>Fuente</b>	<b>GL</b>	<b>SC Ajust.</b>	<b>MC Ajust.</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
Tratamientos	4	6.200	1.5500	1.63	0.230 <sup>ns</sup>
Repeticiones	3	1.350	0.4500	0.47	0.706 <sup>ns</sup>
Error	12	11.400	0.9500		
Total	19	18.950			

CV= 1.26%

Como se puede apreciar en el cuadro anterior, el coeficiente de variación fue 1.26% lo cual establece que los datos fueron uniformes y que presentaron muy poca variación entre unidades experimentales y tratamientos. Esto indica que los datos son confiables y que la investigación se manejó de forma correcta la información generada a partir de los datos analizados.

De acuerdo a la significancia en la fuente repeticiones, se puede establecer que no existe significancia estadística con una confiabilidad del 95%, lo que indica que no existe variaciones entre bloques o repeticiones, por lo tanto no influye los resultados finales.

De acuerdo a los resultados obtenidos no existe diferencia estadística significativa entre los tratamientos, por lo tanto, se puede establecer que no existe un efecto del uso de bicarbón proveniente de la biomasa de cuatro especies vegetales sobre los días a cosecha en el cultivo de tomate.

La variable anterior concuerda por lo descrito por Briones (2017) que en su investigación utilizando biocarbón en cultivo de chile jalapeño estableció que no existe diferencia estadística significativa entre los días a cosecha y el uso de biocarbón.

Steiner (2010), establece que el uso de biocarbón muestran efectos benéficos en la fertilidad del suelo, aparte de su contenido de nutrientes y como sumidero de CO<sub>2</sub> atmosférico, debido a su resistencia a la descomposición y mejora en la productividad de los cultivos no se observó un efecto directo en los días a cosecha en el cultivo de tomate.

#### 7.4 Rendimiento (kg/ha)

El rendimiento se estimó en función de las 32 plantas que contenía cada una de las parcelas netas de las unidades experimentales (12 m<sup>2</sup>), para ello se realizaron tres cortes, espaciados a 5 días entre cada uno. CENTA (sf), establece que se debe realizar entre 7 a 8 cortes, en la planación de la investigación debido a la uniformidad de la maduración, se realizaron únicamente 3 cortes y esto concuerda ligeramente con INIFAP quien establece que el número de cortes varía de 4 a 6 dependiendo el vigor y carga de la planta.

La uniformidad de la maduración de los frutos de tomate no está ligada a un efecto del biocarbón ya que de acuerdo a productores de la zona, ellos realizan entre 3 y 5 cortes de acuerdo a la uniformidad de maduración del fruto, además tanto el testigo absoluto como los tratamientos que utilizaron especies vegetales para la obtención de biocarbón se cosecharon el mismo número de veces, variando únicamente los días que se cosecharon pero tal como se estableció en el cuadro anterior. No son estadísticamente diferentes por lo que se concluye que tanto los días a cosecha como los números de cortes fueron uniformes. El siguiente cuadro muestra el porcentaje de la cosecha realizada por corte.

#### Cuadro 16.

*Porcentaje de la producción por corte realizado en cosecha de tomate.*

Tratamientos	% de cosecha por corte		
	1	2	3
Testigo Absoluto	54.64	26.21	19.15
Cascarilla de arroz	57.08	23.33	19.58
Olote de maíz	59.35	27.34	13.31
Rastrojo de ajonjolí	72.31	14.78	12.90
Rastrojo de maíz	62.04	25.63	12.34
Promedio	61.08	23.46	15.46

Este valor es importante para los productores de la zona, ya que ellos estiman que con el primer corte se puede llegar a cubrir los costos de la producción, se puede observar es en el primer corte

donde se realiza la mayor cantidad de frutos cosechados, teniendo en promedio 61.08%, mientras que el porcentaje decrece en los siguientes dos cortes.

En cuanto al variable rendimiento se puede observar que existieron diferentes valores entre los tratamientos, los cuales difieren del testigo absoluto por lo que existió diferencia en cuanto a esta variable. Sin embargo, para establecer dicha diferencia se realizó un análisis de varianza con una confiabilidad del 95% para establecer si las diferencias entre los rendimientos (kg/ha) son o no significativas, los resultados obtenidos fueron:

**Cuadro 17.**

*Análisis de varianza de la variable rendimiento (kg/ha)*

<b>Fuente</b>	<b>GL</b>	<b>SC Ajust.</b>	<b>MC Ajust.</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
Tratamientos	4	333156577	83289144	207.01	0.000**
Repeticiones	3	1131884	377295	0.94	0.453 <sup>ns</sup>
Error	12	4828073	402339		
Total	19	339116534			

CV: 16.2%

De acuerdo al análisis anterior en la fuente de repeticiones no existió diferencia estadística significativa, por lo que se puede establecer que el efecto de bloque no influye en los resultados obtenidos, el diseño experimental cumple su función.

Con respecto al coeficiente de variación este fue de 16.2%, el cual es aceptable, lo que indica que los valores obtenidos presentan una homogeneidad, los resultados obtenidos son confiables, además indica que el experimento se realizó de forma correcta.

Respecto a los tratamientos si existió diferencia estadística significativa, se rechaza la hipótesis nula y se acepta que la diferencia entre los tratamientos muestran diferencia estadística significativa. Sí hay un efecto del biocarbón en la variable rendimiento de cultivo de tomate. Para poder establecer cuál o cuáles tratamientos mostraron diferencia significativa se realizó una prueba de Tukey al 95%. Los resultados obtenidos se presentan a continuación:

**Cuadro 18.***Prueba de Tukey de la variable rendimiento (kg/ha)*

<b>Tratamientos</b>	<b>Rendimiento (kg/ha)</b>	<b>Literales</b>
Olote de maíz	45195.3	A
Rastrojo de maíz	41512.8	B
Rastrojo de Ajonjolí	39577.4	C
Testigo absoluto	35227.3	D
Cascarilla de arroz	34090.9	D

Como se observa en el cuadro anterior el tratamiento que usó olote de maíz como material vegetal para la obtención de biocarbón, mostró mayor rendimiento ya que obtuvo 45195.3 kg/ha, lo cual es superior a la media de producción reportada por Pérez (2012), quien utilizando la misma variedad de tomate (Helios) en Coatepeque, logro obtener una producción de 37315.75 kg/ha aplicado Metanol+ glicina. Se puede establecer que existe un efecto directo entre la aplicación de biocarbón obtenida de olote de maíz y el rendimiento del cultivo de tomate en las condiciones de Hacienda Gracias a Dios.

Respecto al uso de rastrojo de maíz y rastrojo de ajonjolí como material vegetal para obtención de biocarbón, presentaron menores rendimientos con respecto al uso de olote de maíz, pero presentaron rendimientos superiores con respecto al testigo absoluto. Esto comprueba lo establecido por Leather (2002), citado por Hendreaux (2012), quien establece que el uso de biocarbón mejora las propiedades químicas y físicas del suelo van a favorecer el desarrollo óptimo de las plantas, lo que permite la obtención de una mayor producción y mejores defensas contra plagas y enfermedades.

Los resultados obtenidos en la presente investigación supone una alternativa efectiva de utilidad de olote de maíz, ya que el uso de olote como fuente de obtención de biocarbón es benéfico para obtener mayores producciones en tomate. La mayoría de los productores de maíz de la zona lo dejan sin utilizar y se convierte en un problema de desperdicio en el terreno. Otros han buscado alternativas de uso como fuente de alimento en animales o incorporación al suelo sin un proceso previo de descomposición. Sin embargo, debido a la falta de sabor del mismo no se ha

popularizado dicha práctica, además no es una fuente de carbohidratos o energía para el ganado por lo que no se ha extendido dicha práctica entre los ganaderos. Incorporándolo al suelo no es una práctica muy utilizada por los agricultores, representando un costo y su proceso de descomposición es muy lento, por lo que no se observan resultados inmediatos en la productividad de los cultivos.

De acuerdo a Cordoba, *et al.*, (2013), se generan alrededor de 144 millones de toneladas de olote al año, además establece que su uso se ve restringido. En este sentido, el uso o aplicación química del olote ha estado restringido debido a la dificultad que existe para acceder a sus componentes (carácter recalcitrante) e incompleta caracterización química, así como la valoración de sus principales productos (lignina, celulosa y hemicelulosas). Como se presenta en la investigación. La transformación del olote a biocarbón se prevé como una forma de mejorar los rendimientos en el cultivo de tomate (Perez, 2012), así como una alternativa práctica para los productores de maíz de darle una utilidad económica al olote.

La diferencia entre el testigo absoluto y el tratamiento con biocarbón obtenido de olote de maíz es de 9968 kg/ha es notable, por lo tanto el biocarbón de olote de maíz se puede utilizar como una alternativa práctica y de fácil elaboración (dado que la materia prima se encuentra fácilmente en la zona) para mejorar los rendimientos en el cultivo de tomate.

El aumento del rendimiento del cultivo de tomate utilizando biocarbón (a excepción de cascarilla de arroz) se debe posiblemente a que de todos los materiales vegetales utilizados como fuentes de obtención de biocarbón, presentó partículas mas grandes y porosas y de acuerdo a Traxco (2009), estas condiciones físicas de porosidad es ideal para que tanto microorganismos como nutrientes provenientes de la fertilización o del suelo queden adheridos a las mismas, así mismo, el autor indica que el biocarbón mejora la fertilidad de suelo y esto puede observarse en la capacidad de intercambio catiónico de los resultados de los análisis de suelos (se discuten con profundidad más adelante). El suelo tratado con biocarbón de olote presentó 7.82 Cmol(+)/L mientras que el testigo absoluto presentó 7.49 Cmol(+)/L y antes de la siembra este fue de 6.59 Cmol(+)/L. El aumento en el testigo absoluto con respecto al análisis antes de la siembra se debe a que se realizó una aplicación de cal y materia orgánica como fuente de fertilizante, así como la

aplicación de fertilizantes por fertirriego por lo que aumentó la CIC. El tratamiento con biocarbón de olote de maíz la CIC fue superior al testigo por lo que se comprueba que se mejora las condiciones de CIC y fertilidad en el suelo, y por lo tanto se ve reflejado en el rendimiento del cultivo de tomate.

En el caso de biocarbón obtenido de cascarilla de arroz, fue quien presentó menor rendimiento y esto se debe a que a diferencia del biocarbón de de olote de maíz, este se compactó con mucha facilidad, lo que dificultó la pirólisis de la misma y luego de 2 horas aún contenía algunos residuos que no lograron biocarbonizarse. Mientras el olote de maíz la pirólisis se logró a los 40 minutos de iniciado el proceso, obteniendo el 100% del material vegetal transformado a biocarbón. Esto se debe a que la pirólisis se logra en ausencia casi completa de oxígeno, se necesitan cantidades pequeñas para que exista combustión, pero en el caso de cascarilla de arroz el material se compacta fácilmente, tiene una estructura mas rígida y resistente a la carbonización, principalmente silicio el cual es 93% de  $\text{SiO}_2$  de acuerdo a CIT (1998).

Es utilizado para la construcción por su alta resistencia a la degradación lo cual se complementa con lo descrito por Henreaux (2012). La transformación de la cascarilla del arroz se realiza de forma lenta por su alto contenido de silicio, es por tal razón que en la investigación se estima que la incompleta transformación del material, asociada a la compactación y poco espacio poroso, es efecto negativo en el cultivo (obteniendo resultados por debajo del tratamiento, por lo que no se recomienda su uso en cultivo de tomate). Eso se ve asociado a que en el análisis de suelos la cantidad de potasio el cual es esencial en la formación de frutos fue de 0.18  $\text{Cmol}(+)/\text{L}$  mientras que en el tratamiento con olote de maíz fue de 0.33  $\text{Cmol}(+)/\text{L}$ .

Mientras que con la capacidad de intercambio catiónico los efectos son notorios, ya que el tratamiento con cascarilla de arroz fue de 5.92  $\text{Cmol}(+)/\text{L}$  mientras que el testigo absoluto fue de 7.49  $\text{Cmol}(+)/\text{L}$  y antes de la siembra esta se encontraba en 6.59  $\text{Cmol}(+)/\text{L}$ . Lo que puede observarse que el biocarbón con cascarilla de arroz disminuye la CIC efectiva tal como lo demuestran los análisis de suelo.

## 7.5 Volumen de la raíz

Para poder determinar si existe un efecto directo entre la aplicación al suelo de biocarbón obtenida de diferentes fuentes de materiales vegetales en el volumen de las raíces de tomate, se procedió a realizar lectura de las muestras. Se seleccionaron las 32 plantas de la parcela neta y se determinó el volumen de la raíz a través de una probeta en la cual se tomó la lectura del desplazamiento de un volumen conocido al momento de introducir la raíz.

Se identificaron diferentes volúmenes de raíz de acuerdo a cada tratamiento descrito, por lo que se procedió a realizar un análisis de varianza para determinar si existe o no diferencia estadística entre los tratamientos, para ello se utilizó un 95% de confianza. Los resultados obtenidos se presentan a continuación:

**Cuadro 19.**

*Análisis de varianza de la variable volumen de la raíz (cm<sup>3</sup>).*

<b>Fuente</b>	<b>GL</b>	<b>SC Ajust.</b>	<b>MC Ajust.</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
Tratamientos	4	140.048	35.012	23.48	0.000**
Repeticiones	3	8.854	2.951	1.98	0.171 <sup>ns</sup>
Error	12	17.896	1.491		
Total	19	166.798			

CV: 3.07%

De acuerdo al coeficiente de variación, este fue 3.07% lo que indica que los resultados obtenidos son confiables y la variación entre los mismos fue mínima por lo que se puede establecer que los resultados obtenidos son confiables.

La fuente de variación de repeticiones, se puede observar que no existió diferencia estadística significativa entre bloques no existió variaciones, se estima que estos no influyeron en la diferencia estadística de la media de los tratamientos, conjuntamente con el coeficiente de variación que el experimento se manejó de forma correcta.

La fuente de variación de los tratamientos, si existió diferencia estadística significativa, entre las medias generales de los tratamientos de la variable volumen de la raíz provienen del efecto de la aplicación de diferentes fuentes de biocarbón. Se procedió a realizar una prueba múltiple de medias utilizando el comparador Tukey a una confiabilidad del 95%. Las medias del volumen de las raíces expresados en  $\text{cm}^3$  de los tratamientos con sus respectivas literales se describen a continuación:

**Cuadro 20.**

*Prueba de Tukey de la variable volumen de la raíz ( $\text{cm}^3$ ).*

<b>Tratamientos</b>	<b>Volumen de la raíz (<math>\text{cm}^3</math>)</b>	<b>Agrupación</b>
Olote de Maíz	44.25	A
Rastrojo de Maíz	41.05	B
Rastrojo de ajonjolí	38.15	C
Testigo absoluto	37.95	C
Cascarilla de arroz	37.05	C

De acuerdo a Carrillo-Castañeda (2000), el volumen medio de las raíces de una planta de tomate es de 30 a 40  $\text{cm}^3$ , se puede establecer que los resultados obtenidos están dentro de los valores que reportan otros autores.

Se puede determinar de acuerdo a los resultados anteriores que el volumen de la raíz de las plantas mejora con el uso de olote de maíz como fuente para la obtención de biocarbón, lo que coincide con lo descrito por Sohi, *et al.*, (2009). Dentro de los múltiples beneficios menciona que el biocarbón modifica físicamente el suelo de manera que beneficia de forma directa el crecimiento de las raíces, aumenta la retención de agua y nutrientes Montoya (2016), quien establece en su investigación denominada efecto del biocarbón combinado con fertilizantes orgánicos y microorganismos benéficos sobre el desarrollo, productividad y resistencia de las plantas. La aplicación de biocarbón promovió el crecimiento de las plantas, tanto a nivel de la biomasa aérea como del desarrollo radicular. Aumentos similares en la biomasa de la planta al aplicar biocarbón han sido reportados en otros estudios como es el caso de la investigación liderada por Petter y colaboradores (2012).

De lo anterior se puede deducir que el uso de biocarbón favorece el crecimiento de las raíces si se usan como fuente de material vegetal olote de maíz, rastrojo de maíz y rastrojo de ajonjolí, ya que estos presentaron un crecimiento superior al testigo absoluto, siendo significativos el biocarbón proveniente de olote y rastrojo de maíz con respecto al testigo.

El crecimiento del volumen de las raíces, sobre todo en el uso de biocarbón obtenido de olote de maíz se puede deber a la aparición de microorganismos tales como micorrizas ya que el tamaño de la partícula y porosidad de la misma favorecen el desarrollo de las mismas, las cuales colonizan fácilmente las raíces de las plantas cuando estas entran en contacto. Esta deducción se apoya por lo observado en el uso de cascarilla de arroz para biocarbón cuya compactación es alta, la ausencia de porosidad y la completa transformación a biocarbón hizo que el crecimiento de las raíces se vea afectado.

La posible aparición de microorganismos se apoya de lo propuesto por Henreaux (2012), quien a través de la recopilación de información concluye que la incorporación de biocarbón al suelo induce el desarrollo de una mayor diversidad de microorganismos.

Un aumento de la respiración basal del suelo, una mayor diversidad y crecimiento de las poblaciones de bacterias fueron observados en suelos tratados con carbón vegetal en varios estudios. Estos suelos estimularon la colonización por micorrizas, el gran número de poros del biocarbón constituyeron un hábitat de calidad para estos organismos. Esto queda plasmado en la porosidad de las partículas aplicadas ya que se observó mayor tamaño de partículas y poros en olote de maíz, seguido de los rastrojos (maíz y ajonjolí) y por último cascarilla de arroz.

## **7.6 Área correspondiente a la cantidad de material vegetal a utilizar para elaborar 20 ton de biocarbón**

Esta variable se estableció para determinar el área de cultivo que se necesita de cada material vegetal utilizado para producir 20 toneladas de biocarbón.

Para ello se estimó el rendimiento promedio de material vegetal obtenido para cada uno de los tratamientos. Esto se realizó al momento de la obtención del material, para ello se establecieron

pequeñas parcelas de 10 m<sup>2</sup>, en el caso de rastrojo de maíz y ajonjolí se colectó y se pesó la cantidad obtenida y luego se extrapoló para una hectárea. En el caso de olote se recolectó todo el olote proveniente de una desgranadora que realizó el trabajo en una parcela de 2205 m<sup>2</sup>, luego se pesó y se estimó el total por hectárea, mientras que en arroz, se estimó la producción en kg/ha de arroz y luego en la planta procesadora se estimó los kg de cascarilla que se obtiene del producto bruto. Los resultados obtenidos fueron:

**Cuadro 21.**

*Área que se necesita para obtener 20 ton/ha de biocarbón.*

Tratamientos	Rendimiento		kg de biocarbón/ha	Área (ha)/20 ton
	kg/ha	% de eficiencia		
Rastrojo de maíz	3180	48	1526.4	13.10
Olote de maíz	944	68	641.92	31.15
Rastrojo de ajonjolí	4350	46	2001	9.99
Cascarilla de Arroz	1287	69	888.03	22.52

La eficiencia de transformar el material vegetal fue entre el 48% y el 69%, para ello se pesó la cantidad inicial de material vegetal a utilizar y el producto final (biocarbón) obtenido. La mayor eficiencia fue en cascarilla de arroz, aunque cabe resaltar que esta se debió a que no todo el material vegetal pudo transformarse a biocarbón debido a que se dificultó el proceso, principalmente por la textura rígida de la cascarilla (compuesta principalmente de silicio), por lo cual se obtuvo material sin biocarbonizar.

Con respecto al rastrojo de ajonjolí se puede observar que la eficiencia es de 46% siendo similar a rastrojo de maíz (49%), ya que estos poseen restos vegetales tales como la tuza (hojas modificadas que cubren el elote) y hojas que se transforman en ceniza rápidamente, por lo que la biomasa de biocarbón disminuye con relación a los otros tipos de materiales vegetales.

De acuerdo al rendimiento obtenido de rastrojo de maíz y olote de maíz en la zona fue de 3180 y 944 kg/ha respectivamente asumiendo una densidad de siembra de 60000 plantas/ha, y según Muñoz, *et al.*, (2013), el rendimiento de rastrojo esta entre los 3300 kg a 16500 kg en función de

variedades o híbridos utilizados. De acuerdo a Basaure (2008), el 11.8% del rastrojo corresponde a olote de maíz y el 38.5% corresponde a rastrojo (panoja, tallos, tuza y hojas) y establece que de un rendimiento de 10000 kg/ha de rastrojo, 3850 kg/ha corresponde a rastrojo de maíz y 1180 kg/ha corresponde a olote de maíz por lo que los valores obtenidos en campo son similares a los reportados por Mérida (2013) y Basaure (2008).

La cantidad de rastrojo de ajonjolí registrada en la zona fue de 4350 kg/ha lo cual coincide por lo establecido por Vaca, *et al.*, (2001), en relación a materia seca es: Tallos 2840 kg/ha y hojas 2058 kg/ha por lo que el total de rastrojo de ajonjolí es de 4898 kg/ha por lo que los valores obtenidos estan dentro del rango.

Con respecto a la cascarilla de arroz el rendimiento estimado es de 1287 kg/ha, de acuerdo a CIT (1998), de una tonelada de arroz se puede obtener hasta 286 kg de cascarilla de arroz y el rendimiento estimado es de 4 ton/ha de arroz con cascarilla entonces se espera un rendimiento de 1144 kg/ha de cascarilla de arroz. Razón por la cual se puede estimar que los valores estan dentro del rango esperado.

Los valores anteriores son indispensables para poder estimar el área de cultivo que se necesita para poder obtener la biomasa de estos materiales vegetales y producir 20 toneladas de biocarbón, la cual corresponde a la cantidad de biocarbón aplicado en la presente investigación.

Existen algunos materiales vegetales que no tienen valor alguno para el agricultor, tal es el caso de olote de maíz, mientras que el rastrojo de maíz y ajonjolí si presentan cierto valor ya que es utilizado como materia orgánica por los mismos o se vende como alimento para ganado (previo a convertirse en materia seca), mientras que la cascarilla de arroz si presenta un valor considerable, pues esta se utiliza principalmente en la industria de hielo, ya que sirve de aislante térmico y preserva por mas tiempo el hielo en su estado sólido.

Para producir 20 toneladas de Biocarbón se necesitaria 10 hectareas de cultivo de ajonjolí, mientras que para rastrojo de maíz se necesita 13.10 ha, para cascarilla de arroz se necesita 22.52

hectareas y para olote de maíz se necesita 31.15 ha, siendo este último el que presenta mayor cantidad de área a sembrar para obtener 20 ton/ha de biocarbón.

## 7.7 Análisis de costos

Para poder determinar los costos de producción del cultivo de tomate se tomaron en cuenta todos y cada uno de los gastos incurridos. El siguiente cuadro detalla cada uno de los gastos incurridos.

### Cuadro 22.

*Costos de producción de una hectárea de tomate.*

Concepto	Unidad	Costo Unitario	Unidades	TOTAL
Renta de la tierra	Hectárea	Q2,267.00	1	Q2,267.00
Arado	Hectárea	Q567.00	1	Q567.00
Rastreado	Hectárea	Q340.00	1	Q340.00
Surqueado	Hectárea	Q200.00	1	Q200.00
Pilones	Pilón	Q0.45	20000	Q9,000.00
10-50-0	Quintal	Q280.00	15	Q4,200.00
46-0-0	Quintal	Q275.00	10	Q2,750.00
0-0-60	Quintal	Q320.00	15	Q4,800.00
Control manual de malezas	Jornal	Q75.00	10	Q750.00
Aplicación de productos químicos	Jornal	Q75.00	50	Q3,750.00
Siembra de pilones	Jornal	Q75.00	10	Q750.00
Tutoreado	Jornal	Q75.00	15	Q1,125.00
Cosecha	Jornal	Q75.00	45	Q3,375.00
Pita	Rollo	Q125.00	7	Q875.00
Blindage	Octavo	Q45.00	2	Q90.00
Afix (adherente)	Litro	Q50.00	4	Q200.00
Prevalor	Litro	Q350.00	3	Q1,050.00
Antracol	Kilogramo	Q95.00	6	Q570.00
Mancozeb	Kilogramo	Q50.00	8	Q400.00
Cosmoroot	Kilogramo	Q150.00	10	Q1,500.00
Bayfolan	Galón	Q250.00	5	Q1,250.00

Decis 10	Litro	Q350.00	4	Q1,400.00
Amistar	50 g	Q200.00	5	Q1,000.00
Calcio/boro	Galón	Q100.00	3	Q300.00
Match	Litro	Q600.00	3	Q1,800.00
Agil	Litro	Q250.00	10	Q2,500.00
Monarca	Litro	Q350.00	6	Q2,100.00
Ridomild Gold	Kilogramo	Q225.00	5	Q1,125.00
Kaindor	sobre 250 g	Q325.00	8	Q2,600.00
Riego	Jornal	Q75.00	40	Q3,000.00
Depreciación de equipo de riego	Unidad	Q5,000.00	1	Q5,000.00
Alquiler de la bomba	Unidad	Q1,500.00	1	Q1,500.00
Cintas de goteo	Rollo	Q1,250.00	10	Q12,500.00
Mulch	Rollo	Q400.00	20	Q8,000.00
Colocación de mulch	jornal	Q75.00	15	Q1,125.00
Colocación de equipo de riego	Jornal	Q75.00	5	Q375.00
Tubería de riego	Tubo	Q75.00	20	Q1,500.00
<b>TOTAL</b>				<b>Q85,634.00</b>

Para los costos totales se estimó que el rastreo de maíz tiene un costo unitario de Q0.05/kg, el de rastreo de maíz Q0.04/kg, el olote de maíz Q5.00/kg, el costo unitario del rastreo de ajonjolí fue de Q0.05/kg, mientras que el costo mas elevado es el de cascarilla de arroz con un valor de Q0.22/kg

**Cuadro 23.**

*Costos totales por tratamiento.*

<b>Tratamiento</b>	<b>Costos por hectárea</b>	<b>Costo de material vegetal</b>	<b>Costo total</b>
Testigo Absoluto (T1)	Q85,634.00	0	Q85,634.00
Rastrojo de maíz (T2)	Q85,634.00	159	Q85,793.00
Olote de maíz (T3)	Q85,634.00	37.76	Q85,671.76
Rastrojo de ajonjolí (T4)	Q85,634.00	217.5	Q85,851.50
Cascarilla de Arroz (T5)	Q85,634.00	283.14	Q85,917.14

El tratamiento con mayores costos fue el de Cascarilla de Arroz con un total de Q85,917.14, mientras que el testigo absoluto fue el de menor costo con Q 85,634.00

Para la relación beneficio/costo, se estimó el precio de la caja de 50 lb, el cual estaba a Q75.00, por lo que el costo por kg es de Q3.30 y luego se estimó en función de los rendimientos de cada cultivo. La relación beneficio/costo se detalla a continuación:

**Cuadro 24.**

*Relación beneficio/costo.*

<b>Tratamiento</b>	<b>Costo total</b>	<b>Beneficio</b>	<b>Relación b/c</b>
Testigo Absoluto	Q85,634.00	Q30,616.09	0.35
Rastrojo de maíz	Q85,793.00	Q51,199.24	0.59
Olote de maíz	Q85,671.76	Q63,472.73	0.74
Rastrojo de ajonjolí	Q85,851.50	Q44,753.92	0.52
Cascarilla de Arroz	Q85,917.14	Q26,582.83	0.30

Como se observa en el cuadro anterior, el de tratamiento de mayor relación beneficio/costo es del olote de maíz, mientras que el de menor relación beneficio/costo es el de cascarilla de arroz.

## 8. CONCLUSIONES

Se determinó a partir de los resultados de análisis de suelos que el biocarbón influye de manera directa en la fertilidad del suelo, observándose principalmente sobre la CICE, siendo el olote de maíz el que produjo mayor CICE con 7.82 Cmol(+)/L mientras que previo a la investigación fue de 6.59 Cmol(+)/L, mientras que el uso de biocarbón de cascarilla de arroz produce un efecto negativo en la fertilidad ya que disminuyó la CIC a 5.92 Cmol (+)/L y acidificó el suelo (pH de 5.86) condicionando la disponibilidad de nutrientes.

El uso de biocarbón no tiene un efecto significativo sobre los días a floración, siendo el promedio 54 días.

No hay un efecto significativo sobre los días a cosecha, siendo 77 días el promedio de todos los tratamientos evaluados.

El uso de biocarbón si influye directamente sobre el rendimiento en el cultivo de tomate. El mayor rendimiento se obtuvo utilizando olote de maíz con 45195.3 kg/ha, mientras que el menor rendimiento se obtuvo utilizando cascarilla de arroz con 34090.9 kh/ha.

El uso de diferentes fuentes de biocarbón influyó en el volumen de raíz, siendo olote de maíz superior a los demas con una media de 44.25 cm<sup>3</sup>.

Se estimó en función del rendimiento de cada material la cantidad de área que se necesita para producir 20 ton de biocarbón. El uso de olote de maíz es quien produce mejores rendimientos de tomate (kg/ha) para ello se necesita 31.15 Ha de maíz para obtener olote y producir 20 toneladas de biocarbón.

El tratamiento que obtuvo la mayor relación b/c fue olote de maíz siendo esta 0.74, mientras que la cascarilla de arroz obtuvo la menor relación beneficio/costo siendo esta 0.30. El testigo absoluto obtuvo una relación beneficio/costo de 0.35.

## **9. RECOMENDACIONES**

Utilizar olote de maíz como material vegetal para la obtención de biocarbón y su uso en el cultivo de tomate, ya que este mejora la CICe y los rendimientos en dicho cultivo.

Respecto a la cascarilla de arroz, realizar otros mecanismos para poder realizar la pirólisis, ya que esta presenta muchas dificultades en su transformación, posiblemente el producto final y los resultados no son los adecuados.

Realizar otras investigaciones que involucren otros materiales vegetales que tiendan a producir biocarbones que contengan porosidad, ya que al parecer este condiciona la retención de nutrientes, absorción de agua y colonización de organismos benéficos.

Realizar análisis de laboratorio que ayuden a determinar la presencia de organismos benéficos presentes en la porosidad del biocarbón.

Hacer estudios por periodos de tiempo mas prolongados para evaluar si el biocarbón continúa interactuando con la fertilidad del suelo y su consecuente efecto sobre el rendimiento del cultivo.

## 10. BIBLIOGRAFÍA

- Abenza, D. (2012). Evaluación del efecto de varios tipos de biochar en suelo y planta. (En línea). Universidad Autónoma de Barcelona. Consultado el 31 de Agosto de 2016. Disponible en: [https://ddd.uab.cat/pub/trerecpro/2012/hdl\\_2072\\_202695/PFC\\_DanielPacoAbenza.pdf](https://ddd.uab.cat/pub/trerecpro/2012/hdl_2072_202695/PFC_DanielPacoAbenza.pdf)
- Aker, C. Soto, G. Imbach, A. Castillo, X. Garro, F. (2015). Efecto de la aplicación de biocarbón, gallinaza y fertilizantes sintéticos en la retención de humedad y otras características de suelo en el rendimiento de maíz (*Zea mays*), en tres texturas de suelo en León, Nicaragua. Consultado el 04 de noviembre de 2016. Disponible en: [http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/8116/Efecto\\_de\\_la\\_aplicacion\\_de\\_biocarbon.pdf;jsessionid=E5BCC925CBF9EBFBDC035EC35AF9ED5B?sequence=1](http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/8116/Efecto_de_la_aplicacion_de_biocarbon.pdf;jsessionid=E5BCC925CBF9EBFBDC035EC35AF9ED5B?sequence=1)
- Alcañiz, J. (2012). Evaluación de varios tipos de biochar en suelo y planta. (En línea). Consultado el 19 de agosto de 2016. Disponible en: [https://ddd.uab.cat/pub/trerecpro/2012/hdl\\_2072\\_202695/PFC\\_DanielPacoAbenza.pdf](https://ddd.uab.cat/pub/trerecpro/2012/hdl_2072_202695/PFC_DanielPacoAbenza.pdf)
- Altamirano, C. Calderón, C. Diez, M.C. Gallardo, F. (2013). Uso de biocarbón proveniente de una caldera de biomasa en el cultivo de Maíz en un Andisol en el sur de Chile. Consultado el 04 de noviembre de 2016. Disponible en: [http://www.sbera.org.br/3sigera/obras/in\\_uso\\_07\\_CAltamirano.pdf](http://www.sbera.org.br/3sigera/obras/in_uso_07_CAltamirano.pdf).
- Arbaz, N. (2011). El biocarbón como material orgánico para la mejora del suelo. (en línea). Consultado el 18 de agosto de 2016. Disponible en: <http://www.dc.delinat-institut.org/doc/espagnol/biocarbon-como-material-para.pdf>
- Basterrechea, R. (2005). Tomates de Guatemala. (En línea). Consultado el 12 de Noviembre de 2009. Disponible en: <http://www.tomatesdeguatemala.com>

Basaure, P. (29 de Febrero de 2008). Maíz, Composición de rastrojo . Obtenido de <http://www.manualdelombricultura.com/foro/mensajes/15476.html>

Bilbao, R. (2009). Aprovechamiento térmico de la biomasa. Consultado el 19 de Agosto de 2016. Disponible en: [http://benasque.org/2009fronterasenergia/talks\\_contr/072Aprovechamiento\\_Biomasa.pdf](http://benasque.org/2009fronterasenergia/talks_contr/072Aprovechamiento_Biomasa.pdf)

Briones Lopez , W. (2017). El cultivo de pimiento (*Capsicum annum* L) y su respuesta a la aplicación de Biocarbón. Obtenido de [http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/20061/1/UNIVERSIDAD%20DE%20GUAY AQUIL%20%20proyecto%20final%2031.pdf](http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/20061/1/UNIVERSIDAD%20DE%20GUAY%20AQUIL%20%20proyecto%20final%2031.pdf)

CHEMONICS (2008). Programa de diversificación hortícola, proyecto de desarrollo de la cadena de valor y conglomerado hortícola. Cultivo de Tomate (*Lycopersicum esculentum* o *Solanum lycopersicum*) (En línea). Consultado el 18 de agosto de 2016. Disponible en: <http://cenida.una.edu.ni/relectronicos/RENF01CH517t.pdf>

CENTA, (sf). Guía técnica del cultivo de Tomate (En línea). Consultado el 16 de agosto de 2016. Disponible en: <http://www.centa.gob.sv/docs/guias/hortalizas/Guia%20Tomate.pdf>

Cobo, D. (2012). Pirólisis de residuos de cosecha de caña de azúcar (RAC) como alternativa de aprovechamiento en proceso de cogeneración (En línea). Consultado el 19 de agosto de 2016. Disponible en: <http://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/10893/8696/1/TESIS-final-pirolisis-RAC.pdf>

Cordoba , J. A., Salcedo , E., Rodriguez, R., Zamora, J. F., Martinez, R., Contreras, H., . . . Delgado, E. (Abril de 2013). Caracterización y valoración química del olote: Degradación hidrotérmica, bajo condiciones subscrias. . Obtenido de <http://www.scielo.org.mx/pdf/rlq/v41n3/v41n3a4.pdf>

Empresas, U. d. (sf). Facultad de Ciencias Agrarias . Obtenido de [http://www.fca-ude.edu.uy/upload/Materiales/FOTOPERIODISMO\\_interior-0056-0247.pdf](http://www.fca-ude.edu.uy/upload/Materiales/FOTOPERIODISMO_interior-0056-0247.pdf)

Escalante, M. (2013). Biocarbones (biochars) caracterización y efecto en la biomasa y nutrición de N, P K en una gramínea (En línea). Consultado el 19 de Agosto de 2016. Disponible en:

[http://www.biblio.colpos.mx:8080/xmlui/bitstream/10521/2209/1/Escalante\\_Rebolledo\\_MA\\_DC\\_Edafologia\\_2013.pdf](http://www.biblio.colpos.mx:8080/xmlui/bitstream/10521/2209/1/Escalante_Rebolledo_MA_DC_Edafologia_2013.pdf)

Escalona, M. Alvarado, J. Monardes, A. Urbina, N. Martín, A. (2009). Manual del cultivo de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill). Nodo Hortícola VI región. Consultado el 16 de Agosto de 2016. Disponible en: [http://www.cepoc.uchile.cl/pdf/Manua\\_Cultivo\\_tomate.pdf](http://www.cepoc.uchile.cl/pdf/Manua_Cultivo_tomate.pdf)

FAO. (2013). Cultivo de tomate con buenas prácticas agrícolas en la agricultura urbana y periurbana (En línea). Consultado el 18 de Agosto de 2016. Disponible en: <http://www.fao.org/3/a-i3359s.pdf>

Fowles, M. (2007). “Black carbon sequestration as an alternative to bioenergy”. *Biomass and Bioenergy* 31, 426-432.

Glaser B., Balashov E., Haumaier L., Guggenberger G., Zech W. (2000). “Black carbon in density fractions of anthropogenic soils of the Brazilian Amazon region”. *Organic Geochemistry* 31:669-678.

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

Henreaux, J. (2012). Efecto del biocarbón combinado con fertilizantes orgánicos y microorganismos benéficos sobre el desarrollo, productividad y resistencia de las plantas,

Turrialba, Costa Rica. (En línea) Consultado el 19 de agosto de 2016. Disponible en: <http://orton.catie.ac.cr/repdoc/A8947e/A8947e.pdf>

INIFAP. (2001). Guía para cultivar tomate de cascara en el estado de Morelos . Obtenido de <http://www.cofupro.org.mx/cofupro/images/contenidoweb/indice/unidadmorelos/libros/hortalizas/hortalizas12.pdf>

ITIS. (2016). Taxonomic serial No 30554, *Lycopersicon esculentum* Mill (en línea). Consultado el 09 de noviembre de 2016. Disponible en: [https://www.itis.gov/servlet/SingleRpt/SingleRpt?search\\_topic=TSN&search\\_value=30554#null](https://www.itis.gov/servlet/SingleRpt/SingleRpt?search_topic=TSN&search_value=30554#null)

Julca, A. Meneses, F. Blas, R. Bello, S (2006). La materia orgánica, importancia y experiencia de su uso en la agricultura (en línea). Consultado el 9 de noviembre de 2016. Disponible en: [http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-34292006000100009](http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-34292006000100009)

Kuzyakov Y, Subbotina I, Chen H, Bogomolova I, Xu X (2009): Black carbon decomposition and incorporation into soil microbial biomass estimated by <sup>14</sup>C labeling. *Soil Biology & Biochemistry* 41, 210-219.

Lehmann J (2007): Bio-energy in the black. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 381-387.

Lehmann, J., Gaunt, J. & Rondon, M. (2006). “Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems — a review”. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 11: 403–427

Lehmann J, Joseph S (2009): What is Biochar In: *Biochar for environmental management - science and technology*, Lehmann J, Joseph S (Eds). earthscan, London 183-205. Ogawa M, Okimori Y (2010): Pioneering works in biochar research, Japan In: *Australian Journal of Soil Research* Volume 48, S. 489 – 500

- Lehmann J., Matthias C. Rillig, Janice Thies, Caroline A. Masiello, William C. Hockaday, David Crowley. (2011). "Biochar effects on soil biota- a review". *Soil Biology and Biochemistry* 43 (2011) 1812- 1836.
- MAGA. 2014. Perfil comercial tomate (En línea). Consultado el 16 de agosto de 2016. Disponible en: <http://web.maga.gob.gt/download/Perfil%20tomate.pdf>
- Major, J. Ph.D (2010). "Biochar for soil quality improvement, climate change mitigations and more", a literature review.
- Montoya Pizarro, L. M. (2016). ESTUDIO DE LAS INTERACCIONES PLANTA-BACTERIA-BIOCARBÓN Y DE SU EFECTO PROMOTOR DE LA PRODUCTIVIDAD DE ESPECIES DE CULTIVOS. Obtenido de [https://repository.icesi.edu.co/biblioteca\\_digital/bitstream/10906/81093/1/montoya\\_estudio\\_interacciones\\_2016.pdf](https://repository.icesi.edu.co/biblioteca_digital/bitstream/10906/81093/1/montoya_estudio_interacciones_2016.pdf)
- Muñoz, F., Guerrero, J. D., López, P. A., Gil, A., López, H., Ortiz, E., . . . Valadez, M. (Octubre de 2013). Producción de rastrojo, granos y variedades locales de maíz en condiciones de temporal en los valles altos de Libres-Serdán, Puebla. . Obtenido de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-11242013000400009](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11242013000400009)
- Perez, J. (2012). "Efecto de cuatro dosis de metanol + glicina para estimular la producción del fruto de tomate (*Solanum lycopersicum*, Solanaceae) en el Caserío Pueblo Nuevo, Coatepeque Quetzaltenango. Tesis Ing. Agr. Universidad Rafael Landívar de Guatemala. 52 Pp.
- Pichler B (2010). Biokohle in Weinbergböden, *Ithaka-Journal für Biodiversität*, ISSN 1663- 0521
- Simmons, C.; Tarano, J. y Pinto, J. (1959). Clasificación a nivel de reconocimiento de los suelos de la república de Guatemala. Instituto Agrícola Nacional, Guatemala. 1000p.

- Sohi, S. Loez-Capel, E., Krull, E., Bol, R. (2009). "Biochar's roles in soil and climate change: A review of research needs". CSIRO Land and Water Science Report 05/09, 64pp.
- Steiner, C., Keshav, C.D., Garcia, M., Forster, B., Zech, W. (2008). "Charcoal and smoke extract stimulate the soil microbial community in a highly weathered xanthic Ferralsol". *Pedobiologia* 51, 359-356.
- Steiner, C. (2010). La perspectiva del biocarbón - secuestro de Carbono, ciclo de nutrientes y generación de energía. Obtenido de <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/1558>
- Traxco. (13 de Diciembre de 2009). Biocarbón, poder fertilizante. Obtenido de <https://www.traxco.es/blog/labores-del-campo/biocarbon-poder-fertilizante>
- Vaca, F., Vasquez, J., Vasquez, V., & Vasquez, J. (2001). El cultivo de ajonjolí. Obtenido de [https://bdigital.zamorano.edu/bitstream/11036/2550/1/210904\\_0325%20ajonjoli.pdf](https://bdigital.zamorano.edu/bitstream/11036/2550/1/210904_0325%20ajonjoli.pdf)
- Van Zwieten L., Singh B., Joseph S., Kimber S., Cowie A., Chan Y. (2009). "Biochar and Emissions of Non-CO2 Greenhouse Gases from Soil" (Capítulo 13), en: J. Lehmann and S. Joseph (Eds.), *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*, Earthscan, London, UK. pp.227.

## 11. ANEXOS

### Anexo A. Cronograma de actividades

ACTIVIDAD	Marzo				Abril				Mayo				Junio			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Preparación del terreno																
Elaboración de surcos																
Instalación de riego																
Trasplante																
Control de malezas																
Fertilización																
Plan fitosanitario																
Elaboración de biocarbón																
Aplicación de biocarbón																
Variables de respuestas																
Análisis de suelo																
Días a floración																
Días a cosecha																
Rendimiento																
Volumen de la raíz																
Rentabilidad																

**Anexo B.** Elaboración de biocarbón.



**Anexo C.** Investigación de biocarbón en cultivo de tomate.



**Anexo D.** Cosecha de cultivo de tomate.



**Anexo E.** Revisión de la plantación.



**Anexo F.** Incorporación de biocarbón al suelo.



Anexo G. Análisis de suelos realizados en la investigación.

ORDEN: 25 - 96 ANALISIS: AS-2  
 CLIENTE: PEQUEÑOS PRODUCTORES,  
 FINCA: HACIENDA GRACIAS A DIOS  
 LOCALIZACIÓN: COATEPEQUE QUETZALTENANGO  
 CULTIVO: TOMATE  
 Fecha de Ingreso: 12/10/2017 Fecha de Ejecución: 17/10/2017 15:49 Fecha de Impresión: 23/10/2017



Informe de Resultados de Análisis de Suelos

Identificación de la Muestra	pH	mg/L			Cmol(+) / L			mg/L			Cmol(+) / L			%
		Boro	Fósforo	Potasio	Calcio	Magnesio	Azufre	Cobre	% Al	Hierro	Manganeso	Zinc		
No. Niveles Adecuados -->	5.5-6.8	1.5	10-20	0.2-0.6	4-20	1-5	10-100	0.1-2.5	0.1-2	20-150	8-80	0.2-2	3-6	
285 LOTE NO. 1 RASTROJO DE MAÍZ	6.19	0.36	11.55	0.23	4.65	1.83	5.32	4.92	0.11	49.96	54.44	2.78	3.09	
286 LOTE NO. 2 RASTROJO DE AJONOLÍ	6.02	0.02	7.17	0.33	4.53	1.81	8.32	4.85	0.10	48.06	69.94	2.59	2.95	
287 LOTE NO. 3 CASCARILLA DE ARROZ	5.86	0.33	7.38	0.18	4.04	1.59	6.51	5.31	0.11	51.98	78.60	2.50	2.68	
288 LOTE NO. 4 OJOTE DE MAÍZ	5.99	0.06	1.84	0.39	5.43	1.92	6.52	4.19	0.08	37.38	96.02	1.75	3.26	
289 LOTE NO. 5 TESTIGO ABSOLUTO	5.92	0.31	2.38	0.12	5.44	1.82	7.25	3.51	0.11	26.56	99.30	1.18	2.76	
290 LOTE NO. GANTES DE SIEMBRA	6.03	0.01	7.20	0.22	4.66	1.61	7.19	4.97	0.10	64.04	61.82	2.31	2.56	

\*A.L.: Acidez Intercambiable (Hidrogeno + Aluminio)  
 \*M.O.: Materia Orgánica  
 \*C.S.: Concentración de sales

Identificación de la Muestra	Cmol(+) / L	Porcentaje de Saturación en la CICE					Equilibrio de Bases				Nomenclatura
		*CICE	K	Ca	Mg	A.L	Ca/K	Mg/K	Ca/Mg	Ca-Mg/K	
Muestra Niveles Adecuados -->	5-25	4-6	60-80	10-20	0-24.9	5-25	2.5-15	2-5	10-40		
285 LOTE NO. 1 RASTROJO DE MAÍZ	6.82	3.37	68.18	26.83	1.61	20.22	7.96	2.54	28.17		
286 LOTE NO. 2 RASTROJO DE AJONOLÍ	6.77	4.87	66.91	26.74	1.48	13.73	5.48	2.50	19.21		
287 LOTE NO. 3 CASCARILLA DE ARROZ	5.92	3.04	68.24	26.86	1.86	22.44	8.83	2.54	31.28		
288 LOTE NO. 4 OJOTE DE MAÍZ	7.82	4.99	69.44	24.55	1.02	13.92	4.92	2.83	18.85		
289 LOTE NO. 5 TESTIGO ABSOLUTO	7.49	1.60	72.63	24.30	1.47	45.33	15.17	2.99	60.50		
290 LOTE NO. GANTES DE SIEMBRA	6.59	3.34	70.71	24.43	1.52	21.18	7.32	2.89	28.50		

\*CICE=Capacidad de Intercambio Catiónico efectivo

Nomenclatura  
 Al = Aluminio  
 Mg = Magnesio  
 Ca = Calcio  
 K = Potasio

■ = Bajo o Fuera de Rango  
■ = Adecuado  
■ = Alto

Materia orgánica: Método de digestión ácida Walkley y Black.

pH: Determinación por potenciometría en relación 1:2.5 Suelo:Agua

Solución extractante para Acidez Intercambiable: KCl 1 Normal, cuantificación por volumetría.

Solución extractante para Azufre y Boro: Fosfato ácido de calcio, cuantificación por espectrofotometría visible.

Solución extractante para Calcio, Magnesio: KCl 1 Normal, cuantificación por Absorción Atómica.

Solución extractante para Cobre, Hierro, Manganeso y Zinc con : DTPA (ácido di(2-tililamino)pentacético), cuantificación por espectrofotometría de plasma de acoplamiento inductivo ICP.

Solución extractante para Fósforo: Olan modificado, cuantificación por espectrofotometría visible.

Solución extractante para Potasio: Olan modificado, cuantificación por Absorción Atómica.

- 1.- Los resultados de este informe son validos únicamente para la muestra como fue recibida en el laboratorio y en su Impresión ORIGINAL.
- 2.- Los resultados de este informe corresponden a muestras recibidas de acuerdo a los Criterios de Aceptación establecidos por Analab.
- 3.- El laboratorio ANALAB, no se responsabiliza por el uso inadecuado que se le de a este informe
- 4.- La reproducción parcial o total de este informe deberá ser autorizada por escrito por ANALAB.

*[Firma manuscrita]*  
 Ing. Doris [Apellido]  
 Coordinador de Analab