



FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES
CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

“LA APLICACIÓN DE BIOCHAR DE RESIDUOS VERDES Y PURÍN DE CERDO Y
SU EFECTO SOBRE EL FLUJO DE NITRÓGENO PARA EL CULTIVO DE TRES
COSECHAS DE RÁBANO (*Raphanus sativus* L.) EN LURÍN, PERÚ”

Tesis para optar el título profesional de:
INGENIERO(A) AMBIENTAL

Presentado por:
Luz Victoria Palomino Soria

Asesor:
Dr. Brenton Ladd

Lima – Perú
2018

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Lima, 28 de noviembre del 2018.

Los integrantes del Jurado de tesis:

Presidente: Ph.D. Julio Cesar Alegre Orihuela
Integrante: MSc. Javier Francisco Alvarado Llerena
Integrante: Dra. Susan Mery Medina Canzio

Se reúnen para evaluar la tesis titulada:

La aplicación de biochar de residuos verdes y purín de cerdo y su efecto sobre el flujo de nitrógeno para el cultivo de tres cosechas de rábano (*Raphanus Sativus L.*) En Lurín, Perú.

Presentada por la bachiller:

- Luz Victoria Palomino Soria

Para optar el Título Profesional de **Ingeniera Ambiental**

Asesorada por:

- Dr. Brenton Mark Ladd

Luego de haber evaluado el informe final de tesis y evaluado el desempeño de los estudiantes en la sustentación, concluyen de manera unánime () por mayoría simple () calificar a:

Integrante 1: Luz Victoria Palomino Soria			Nota (escrito): CATORCE
Aprobado (<input checked="" type="checkbox"/>)	Aprobado - Muy buena (<input type="checkbox"/>)	Aprobado - Sobresaliente (<input type="checkbox"/>)	Desaprobado (<input type="checkbox"/>)

Los miembros del jurado firman en señal de conformidad.


Presidente del Jurado


Miembro del Jurado


Miembro del Jurado


Asesor

DEDICATORIA

El presente trabajo va dedicado con mucho amor a mi familia, por llenar mis días con sus valiosos consejos y su apoyo constante en cada paso que doy en la vida.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco principalmente a mis padres por estar a mi lado en este camino de crecimiento profesional.

A mi asesor Dr. Brenton Ladd por sus enseñanzas y gran apoyo en este trabajo de investigación.

A Paulo por darme todo su soporte en este gran camino.

A todos mis amigos que me acompañaron en cada proceso que involucro terminar el trabajo de tesis.

INDICE GENERAL

I.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	16
II.	MARCO TEÓRICO	20
1.	Biochar	20
1.1.	Definición	20
1.2.	Origen	21
1.3.	Composición del biochar	23
1.4.	Producción de biochar	24
1.5.	Uso del biochar en suelos agrícolas	28
2.	Residuos verdes	30
3.	Nitrógeno	31
3.1.	Ciclo del Nitrógeno	31
3.2.	Balance de Nitrógeno	34
3.3.	Fertilizantes Nitrogenados	36
4.	Sondas simuladoras de raíces (PRS®)	38
5.	Cultivo de Rábanos	39
6.	Área foliar específica (SLA)	41
III.	OBJETIVOS/HIPÓTESIS	43
1.	Objetivos	43
1.1.	Objetivo principal	43
1.2.	Objetivo específicos	43
2.	Hipótesis	43

IV.	METODOLOGÍA.....	45
1.	Área de estudio.....	45
2.	Materiales.....	46
2.1.	Biochar.....	46
2.2.	Biochar.....	¡Error! Marcador no definido.
2.3.	Ácido Fosfórico.....	47
2.4.	Semillas.....	47
2.5.	Sondas simuladoras de raíces de plantas (PRS).....	48
3.	Metodología.....	48
3.1.	Diseño experimental.....	48
3.2.	Producción de biochar.....	50
3.3.	Estandarización de tratamientos.....	51
3.4.	Montaje del experimento.....	53
3.5.	Sondas PRS®.....	57
3.6.	Determinación del balance de nitrógeno.....	59
a.	N- entrada.....	60
b.	N- salida.....	61
3.7.	Análisis.....	62
V.	RESULTADOS.....	63
1.	Producción de biomasa.....	63
1.1.	Primer ciclo del cultivo.....	63

1.2.	Segundo ciclo del cultivo.....	66
1.3.	Segundo ciclo del cultivo.....	69
2.	Suministro de nitrógeno en el suelo.....	73
2.1.	Nitrato (NO ₃ ⁻).....	73
2.2.	Amonio (NH ₄ ⁺).....	74
3.	Suministro de nitrógeno en el suelo.....	78
1.1.	Primer ciclo del cultivo.....	78
1.2.	Segundo ciclo del cultivo.....	81
1.3.	Tercer ciclo del cultivo.....	84
4.	Suministro de nitrógeno en el suelo.....	86
VI.	DISCUSIÓN.....	90
1.	Producción de biomasa.....	90
1.1.	Producción de biomasa.....	90
1.2.	Área foliar específica (SLA).....	92
2.	Efectos sobre el suministro de nitrógeno en el suelo.....	93
3.	Efectos sobre la absorción de N.....	94
4.	Balance de N.....	96
5.	Impacto económico.....	97
VII.	CONCLUSIONES.....	99
VIII.	RECOMENDACIONES.....	100
IX.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	101
X.	ABREVIATURAS.....	125

XI. ANEXOS..... 126

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Perfiles típicos de terra preta (a) y oxisol (b). Fuente: (Glaser <i>et al.</i> , 2001). ..	22
Figura 2. Representación simple del proceso de pirolisis. Fuente: (Brownsort, 2009) .	25
Figura 3. Diseño de horno tipo kon tiki para la elaboración de biochar. Fuente: (The biochar revolution, 2014)	28
Figura 4. Esquema del ciclo del N. Fuente: (Ceron & Aristizábal, 2012).	34
Figura 5. Efecto de los cinco tratamientos sobre la producción: a) Biomasa vegetativa total, b) Biomasa del fruto y c) Área foliar específica, para el primer ciclo del cultivo rábano (<i>Raphanus sativus</i> L.).	65
Figura 6. Efecto de los cinco tratamientos sobre la producción: a) Biomasa vegetativa total, b) Biomasa del fruto y c) Área foliar específica, para el segundo ciclo del cultivo rábano (<i>Raphanus sativus</i> L.).	68
Figura 7. Efecto de los cinco tratamientos sobre la producción: a) Biomasa vegetativa total, b) Biomasa del fruto y c) Área foliar específica, para el tercer ciclo del cultivo rábano (<i>Raphanus sativus</i> L.).	71
Figura 8. Resumen de los efectos de los cinco tratamientos sobre la producción: a) Biomasa vegetativa total y b) Biomasa del fruto a través de los tres ciclos del cultivo de rábano (<i>Raphanus sativus</i> L.).	72
Figura 9. Efectos de los cinco tratamientos sobre la tasa de suministro de: a) nitratos (NO_3^-) y b) amonio (NH_4^+) en el suelo en los tres ciclos del cultivo.	76
Figura 10. Resumen de los efectos de los cinco tratamientos sobre la tasa de suministro de: a) nitratos (NO_3^-) y b) amonio (NH_4^+) en el suelo a través del periodo completo de los tres ciclos del cultivo (208 días).....	77

Figura 11. Efecto de los cinco tratamientos sobre la retención de N por: a) Biomasa vegetativa total, b) Biomasa del fruto y c) Biomasa de las hojas, para el primer ciclo del cultivo rábano (*Raphanus sativus* L.)..... 80

Figura 12. Efecto de los cinco tratamientos sobre la retención de N por: a) Biomasa vegetativa total, b) Biomasa del fruto y c) Biomasa de las hojas, para el segundo ciclo del cultivo rábano (*Raphanus sativus* L.)..... 83

Figura 15. Perdida de N al finalizar los tres ciclos del cultivo, para cada tratamiento aplicado en el sistema planta-tratamiento-suelo. 88

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ficha técnica de la urea granulada.	47
Tabla 2. Ficha técnica del ácido fosfórico.....	47
Tabla 3. Distribución de los cinco tratamientos de acuerdo al diseño experimental de bloques completamente al azar.	49
Tabla 4. Cantidad en (Gramos de tratamiento/tubo) de los cinco tratamientos estandarizados a una tasa de aplicación de 100 kg de N/ha, considerando el % de humedad.....	53
Tabla 5. Calendario de siembra, raleo de semillas germinadas, colocación de PRS y cosecha para cada ciclo del cultivo	56
Tabla 6. Distribución de las sondas PRS para el primer ciclo del cultivo	57
Tabla 7. Distribución de las sondas PRS para el segundo ciclo del cultivo.....	58
Tabla 8. Distribución de las sondas PRS para el tercer ciclo del cultivo.....	58
Tabla 9. Resultado de las medias y los subgrupos homogéneos indicados por la misma letra, de la producción de biomasa vegetativa total, biomasa del fruto y área foliar específica, para el primer ciclo del cultivo de los cinco tratamientos.	64
Tabla 10. Resultado de las medias y los subgrupos homogéneos indicados por la misma letra, de la producción de biomasa vegetativa total, biomasa del fruto y área foliar específica, para el segundo ciclo del cultivo de los cinco tratamientos.	66
Tabla 11. Resultado de las medias y los subgrupos homogéneos indicados por la misma letra, de la producción de biomasa vegetativa total, biomasa del fruto y área foliar específica, para el tercer ciclo del cultivo de los cinco tratamientos.....	69
Tabla 12. Resultado de las medias del suministro de nitratos (NO_3^-) en el suelo y los subgrupos homogéneos indicados por la misma letra, para los tres ciclos del cultivo.	74
	10

Tabla 13. Resultado de las medias del suministro de amonio (NH_4^+) en el suelo y los subgrupos homogéneos indicados por la misma letra, para los tres ciclos del cultivo. 75

Tabla 14. Resultado de las medias y los subgrupos homogéneos indicados por la misma letra, de la absorción de N por biomasa vegetativa total, biomasa del fruto y biomasa de hojas, para el primer ciclo del cultivo..... 79

Tabla 15. Resultado de las medias y los subgrupos homogéneos indicados por la misma letra, de la absorción de N por biomasa vegetativa total, biomasa del fruto y biomasa de hojas, para el segundo ciclo del cultivo..... 81

Tabla 16. Resultado de las medias y los subgrupos homogéneos indicados por la misma letra, de la absorción de N por biomasa vegetativa total, biomasa del fruto y biomasa de hojas, para el tercer ciclo del cultivo..... 84

Tabla 17. Resumen de las entradas de N dentro del sistema planta-tratamiento-suelo. 86

Tabla 18. Resumen del balance del nitrógeno para cada tratamiento a través de las tres ciclo de cultivo. 87

Tabla 19. Resultado de las medias y subgrupos homogéneos para la pérdida de N del sistema productivo al finalizar los tres ciclos del cultivo. 88

INDICE DE ANEXOS

Anexo 1 Producción del biochar y mezcla de biochar con urea	126
Anexo 2. Montaje del experimento	127
Anexo 3. Sondas PRS.....	128
Anexo 4. Ciclos del cultivo	129
Anexo 5. Cosechas de los diferentes tratamientos	130
Anexo 6. Datos meteorológicos de la Estación Antonio Raimondi – 472A218A Temperatura (°C) para el primer ciclo del cultivo	131
Anexo 7. Datos meteorológicos de la Estación Antonio Raimondi – 472A218A Temperatura (°C) para el segundo ciclo del cultivo.....	134
Anexo 8. Datos meteorológicos de la Estación Antonio Raimondi – 472A218A Temperatura (°C) para el tercer ciclo del cultivo	137
Anexo 9. Resultado del primer ciclo del cultivo	140
Anexo 10. Resultado del segundo ciclo del cultivo.....	142
Anexo 11. Resultado del tercer ciclo del cultivo	144
Anexo 12. Resultado del Stock final de N en el suelo	146
Anexo 13. Balance de N.....	148
Anexo 14. Resultados de sondas PRS: NO ₃ -N	151
Anexo 15. Resultados de sondas PRS: NH ₄ ⁺ N	154
Anexo 16. Resultado de análisis de varianza (ANOVA) con los efectos principales de los tratamientos en la producción de biomasa y área foliar específica (SLA) para el primer ciclo del cultivo de <i>Raphanus sativus</i> L.....	157
Anexo 17. Resultado de análisis de varianza (ANOVA) con los efectos principales de los tratamientos en la producción de biomasa y área foliar específica (SLA) para el segundo ciclo del cultivo de <i>Raphanus sativus</i> L.	158

Anexo 18. Resultado de análisis de varianza (ANOVA) con los efectos principales de los tratamientos en la producción de biomasa y área foliar específica (SLA) para el tercer ciclo del cultivo de <i>Raphanus sativus</i> L.....	159
Anexo 19. Resultado de análisis de varianza (ANOVA) con los efectos principales de los tratamientos en el suministro de nitrato (NO_3^-) para los tres ciclos del cultivo	160
Anexo 20. Resultado de análisis de varianza (ANOVA) con los efectos principales de los tratamientos en el suministro de amonio (NH_4^+) para los tres ciclos del cultivo	161
Anexo 21. Resultado de análisis de varianza (ANOVA) con los efectos principales de los tratamientos en la absorción de N de la biomasa para el primer ciclo del cultivo de <i>Raphanus sativus</i> L.....	162
Anexo 22. Resultado de análisis de varianza (ANOVA) con los efectos principales de los tratamientos en la absorción de N de la biomasa para el segundo ciclo del cultivo de <i>Raphanus sativus</i> L.....	163
Anexo 23. Resultado de análisis de varianza (ANOVA) con los efectos principales de los tratamientos en la absorción de N de la biomasa para el tercer ciclo del cultivo de <i>Raphanus sativus</i> L.....	164
Anexo 24. Resultado de análisis de varianza (ANOVA) con los efectos principales de los tratamientos en la pérdida de N dentro del sistema planta-biochar-suelo al finalizar los tres ciclos del cultivo.....	165
Anexo 25. Costo total de la producción de cada tratamiento	166
Anexo 27. Certificados de laboratorio	167

RESUMEN

El biochar logra desempeñar un aporte significativo en el ciclo de los nutrientes dentro de los sistemas agrícolas, su uso como enmienda beneficia la retención de nitrógeno en el suelo, bajo esta premisa la presente investigación tiene el objetivo de evaluar el flujo de nitrógeno dentro del sistema planta-biochar-suelo, con el fin de determinar el N perdido al utilizar diferentes tratamientos de biochar aplicado al cultivo de rábano (*Raphanus sativus* L.).

Para la producción de biochar se utilizaron residuos verdes y purín de cerdo, los cuales fueron procesados bajo pirólisis lenta. Para el experimento se usaron los tratamientos: T3: Biochar, T4: Biochar con pH ajustado a neutro y T5: Biochar con pH ajustado a neutro y con ajuste de concentración de N, los tratamientos fueron estandarizados con el fin de aplicar una misma cantidad de N, a una tasa de aplicación de (100 kg de N/ha), en función al requerimiento nutricional del cultivo de rábano.

Se determinó que la retención de N en planta y la pérdida de N obtenida del balance, indican que existe un beneficio medioambiental en la utilización de biochar como enmienda de suelo, debido a que se logra disminuir la pérdida de N a un 36%. Los resultados sugieren que la enmienda de biochar podría ser utilizado como un potencial aditivo que retenga nutrientes con el fin de mejorar la eficiencia de los fertilizantes químicos y evitar su pérdida en los sistemas agrícolas.

Palabras claves: Biochar, cultivo de rábano, balance de nitrógeno y pirólisis

ABSTRACT

Biochar manages to play a significant contribution in the nutrient cycle in agricultural systems. It is used as an soil amendment because has benefits in the retention of nitrogen in the soil, under this premise the presentation of the research has the objective of evaluating the flow of nitrogen within the plant-biochar-soil system in order to determine the N lost using different treatments of biochar, applied to radish crop (*Raphanus sativus* L.).

For the production of biochar, were uses green residues and pig slurry, for the experiment was used the treatments: T3: Biochar, T4: Biochar with pH adjusted to neutral and T5: Biochar with pH adjusted to neutral and adjustment of N concentration, the treatments were standardized, to apply the same amount of N, at a rate of application of (100 kg of N / ha), according to the nutritional requirement of radish crop.

The retention of N in the plant and the loss of N obtained from balance, indicate that there is an environmental benefit in the use of biochar as a soil amendment, because it is possible to reduce the loss of N to a 36% The results suggest that the amendment of biochar could be used as a potential additive that retains nutrients in order to increase the efficiency of use of chemical fertilizers, and avoid their loss in agricultural systems.

Key words: Biochar, radish culture, nitrogen balance and pyrolysis

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera va en constante aumento, teniendo como consecuencia el incremento de las temperaturas y la variación climática global (IPCC, 2014). Dichas emisiones son generadas como consecuencia de las actividades humanas (Stern *et al.*, 2014) como la agricultura que representa en promedio el 12 % anual de emisiones de CO₂ y óxido de nitrógeno como consecuencia de las actividades microbianas generadas en el suelo (nitrificación y desnitrificación) (Davidson *et al.*, 2009).

Adicionalmente a las emisiones de gases producto de la agricultura (Houghton, 2001) se suma como otra consecuencia el deterioro rápido de los suelos, debido a su deficiente manejo. Según estudios se demostró que el 33 % de los suelos a nivel mundial están afectados y como consecuencia están en un estado de degradación moderada y alta (FAO, 2015a).

Así mismo, se sabe que una de las actividades económicas relevantes es la agricultura debido a los ingresos económicos que refleja en nuestro país, ya que el 34% de los hogares peruanos se dedican a esta actividad (Perú Opportunity Found, 2011) siendo la Sierra la zona con mayor número de unidades agropecuarias con 63,9% seguido de la Selva con 20,3% y por último la Costa con 15,8% (INEI, 2012), es así que la agricultura es una actividad que tiene gran parte del uso de suelos (FAO, 2002). Vale mencionar que dada su relevancia en relación al uso del suelo, es importante profundizar en los aspectos negativos generados por un mal manejo de la agricultura, que se intensifican a causa del incremento del uso de fertilizantes nitrogenados.

Si bien es cierto los de fertilizantes nitrogenados generan un impacto positivo en el rendimiento de los cultivos, la aplicación de dichos fertilizantes de forma ineficiente generan contaminación (Cárdenas *et al.*, 2004) siendo una de las principales fuentes de contaminación de agua por nitratos y fosfatos (FAO, 2002) generado por la pérdida del nitrógeno a través de la lixiviación a cuerpos de agua subterránea; igualmente el uso indiscriminado genera altos costos de producción e impactan negativamente con la degradación de suelos. Por estas razones, los fertilizantes son una buena alternativa siempre y cuando se aplique de manera eficiente, sin embargo puede generar fuertes daños al ambiente y grandes pérdidas económicas cuando no se hace un uso apropiado de estos insumos (Cárdenas *et al.*, 2004). Y no solo afecta al ambiente, ya que producto de la lixiviación se ha evidenciado presencia de nitritos y nitratos en el agua de consumo humano (Camargo & Alonso, 2007).

Se proyecta que el uso de los fertilizantes nitrogenados crecerán un 1.8% anual hasta el año 2018 de esta manera su uso podría aumentar por encima de los 200.5 millones de toneladas anuales para el siguiente año, un 25% más que el registrado en el año 2008 y esto se genera con el fin de cubrir la demanda mundial de alimentos; de la misma forma se proyecta que su uso en África requerirá 4.1 millones de Tn, en Europa 15.7 millones, en América 23.5 millones y Asia 74.2 millones de Tn (FAO, 2015b.).

Por lo tanto es de suma importancia promover técnicas agronómicas más sostenibles que nos permitan a largo plazo involucrar a más agricultores convencionales a trabajar bajo el marco de la sostenibilidad, con el fin de evitar y reducir la contaminación, las emisiones de GEI, mitigar el cambio climático, tener un mejor rendimiento de los cultivos que al mismo tiempo aporte en la calidad del suelo (Comisión Europea, 2012).

Ante esta situación se plantea la utilización de biochar, como enmienda de suelo debido a que puede llegar a ser una solución viable para generar cambios efectivos en el suelo que favorezcan a sus propiedades y al rendimiento de los cultivos (Ippolito *et al.*, 2011), ya que se ha evidenciado que puede modificar la propiedades como el pH, la capacidad de intercambio catiónico (CIC), mejorar su retención de agua, además de inmovilizar y mejorar la disponibilidad de los nutrientes en el suelo (Joseph *et al.*, 2010); existen varias investigaciones que demuestran la propiedad del biochar para inmovilizar temporalmente el nitrógeno soluble en su estructura y liberarlo en forma más lenta que los productos inorgánicos, incrementando así su eficiencia, evitando su pérdida por lixiviación y/o emisión a la atmósfera (Zheng *et al.*, 2010), además representa una gran alternativa para la valorización de residuos orgánicos (Jeffery *et al.*, 2015) además gracias a su propiedad de persistir en el suelo sin retorno a la atmósfera contribuye a reducir el impacto del cambio climático (Rebolledo *et al.*, 2016). Por otro lado, se estudia que la implementación de uso de biofertilizantes y fertilizantes minerales en conjunto a la producción y/o uso de biochar podría mejorar la fertilidad de suelos (Yamoah *et al.*, 2002).

El propósito de la presente investigación es evaluar diferentes tratamientos de biochar generados a partir de residuos verdes y purín de cerdo en el cultivo de rábano (*Raphanus sativus* L.) con el fin de determinar el flujo de nitrógeno dentro del sistema planta-biochar-suelo; y así poder cuantificar el nitrógeno que se pierde fuera del sistema productivo por un periodo de tres ciclos del cultivo.

La investigación y el desarrollo del biochar para la gestión ambiental a escala global es un desarrollo relativamente nuevo (Lehmann & Joseph, 2015) y los casos aplicados

específicamente en Lima- Perú, son escasos por esta razón la contribución individual de esta investigación se enfoca en generar información como base sobre el conocimiento de biochar y a reducir los vacíos de información actual sobre su naturaleza e implicancias sobre los entornos ambientales específicos de Perú.

II. MARCO TEÓRICO

1. Biochar

1.1. *Definición*

El término biochar es relativamente nuevo, emergió en conjunto con los temas de manejo y conservación de carbono en el suelo (Lehmann *et al.*, 2006); se define como la materia orgánica carbonizada (Lehmann, 2009) obtenida de la degradación térmica en medios limitado de oxígeno (O₂) y a temperaturas relativamente bajas (<700°C), se distingue del carbón convencional debido a su uso como enmienda del suelo (Lehmann & Joseph, 2015). Esta diferenciación se debe a las características principales del biochar que hacen que sea más atractivo como enmienda, debido a su estructura altamente porosa, responsable de una mejor retención de agua y mayor área de superficie del suelo. La adición del biochar al suelo también se ha asociado con el aumento de nutrientes y así mismo a la estabilidad biológica y química que permite al biochar actuar como sumidero de carbono y proporcionar beneficios al suelo a largo plazo (Sohi *et al.*, 2009).

El biochar al ser usado en el suelo, tiene efectos directos e indirectos sobre diferentes parámetros como su influencia en el destino de los nutrientes que incluyen la provisión directa de macronutrientes (N, P, K y Ca) y micronutrientes (Mg y Zn) (Vassiley *et al.*, 2013). Así mismo, tiene efectos en el pH, redox y en la capacidad de intercambio catiónico (CIC), por otro lado tiene la propiedad de incrementar y mejorar la producción de cultivos (Verheijen *et al.*, 2010), además, el biochar representa una alternativa para

disminuir las emisiones de nitrógeno producto de la agricultura, disminuyendo la pérdida de nitrógeno inorgánico del suelo (Bhupinder *et al.*, 2010) sin embargo, el potencial global del biochar, va mucho más allá de la tala y carbonización; esto se encuentra inspirado en la recreación de la *terra preta* (Steiner, 2007), también llamado Amazonian Dark Earth (Lehmann *et al.*, 2007).

1.2. Origen

El biochar como objetivo de estudio debido a sus beneficios de como enmienda de suelo fue desarrollado en países como Inglaterra o Japón, debido a ahí se realizaban trabajos de investigación en temas de uso de carbón vegetal para producción agrícola a finales del siglo XIX, sin embargo el boom por el interés sobre este tipo de enmienda se dio por los años 1980 (Lehmann, 2009).

Se presume que el origen del descubrimiento del biochar se dio debido al hallazgo de un material semejante al carbón en zonas donde los suelos muy fértiles en el Amazonas en Brasil, los cuales son llamados de manera local como *Terra preta do Indio* (Lehmann, 2009, Lehmann *et al.*, 2006). Los sitios de *terra preta* son identificables por el horizonte A de color negro generalmente encontrado hasta una profundidad de entre los 0.4 y 0.8 m (Figura 1), pudiendo llegar hasta los 2 m de profundidad en comparación a los 0.15 m de los suelos contiguos (Glaser *et al.*, 2001; Neves *et al.* 2003; Lehmann, 2009).



Figura 1. Perfiles típicos de terra preta (a) y oxisol (b). Fuente: (Glaser *et al.*, 2001).

Es ahí de donde se conoce el suelo *Terra Preta*, el cual contiene 70 veces más carbono que otros suelos adyacentes, debido a su estructura poli cíclica aromática, química y microbiológica estable que lo hace persistente en el medio ambiente durante siglos (Glaser *et al.*, 2001). Se presume que este tipo de suelos fueron productos de quema de materia orgánica enterrada en el suelo (Glaser *et al.*, 2002). Sin embargo, el mecanismo clave de la *terra preta* son los residuos domésticos producidos en los asentamientos humanos, entre lo que se incluyen los desechos de comida, heces, orina, materiales de construcción de viviendas, restos de cerámica, piedras, conchas, cenizas y carbón vegetal, que combinados representan una mezcla de residuos minerales, materia vegetal carbonizada y material orgánico descompuesto que tienen como consecuencia altos niveles de materia orgánica del suelo (MOS) y de nutrientes como el nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K) y calcio (Ca) (Woods, 2003; Balliett, 2007).

La segunda razón del interés en la producción del biochar radica en previos estudios que muestran la capacidad del biochar de extender la disponibilidad de nutrientes en el

suelo a largo plazo en comparación a otras enmiendas orgánicas (Cheng *et al.*, 2008, Sohi *et al.*, 2009).

1.3. Composición del biochar

La composición del biochar varía según los insumos con los que se elaboran, sin embargo a manera general los principales compuestos del biochar son el carbono orgánico recalcitrante, macro y micronutrientes, así mismo posee concentración variables de oxígeno (O), hidrógeno (H), azufre (S), cationes, metales pesados y compuestos orgánicos (Shenbagavalli y Mahimairaja, 2012). Sin embargo, su composición es altamente heterogénea, debido a que varía en su estructura y composición química. No obstante algunas propiedades son predominantes como su color oscuro, el pH típicamente neutro a básico, el alto contenido de carbono y el grado de aromaticidad (Verheijen *et al.*, 2012).

El tipo de pirolisis puede variar al biochar, en general el aumento de temperatura de pirolisis tiende a disminuir el rendimiento de biochar, pero incrementa el contenido de carbono (C), potasio (K), magnesio (Mg), pH, el área superficial y la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y la pirolisis lenta en general, tiende a un producir un biochar con mayor Nitrógeno (N), azufre (S), fósforo (P) disponible, calcio (Ca), magnesio (Mg), superficie de área y la capacidad de intercambio catiónico (CIC) (Ippolito *et al.*, 2015).

Según varios estudios, la presencia del nitrógeno (N) es mínima esto es debido a la pérdida que se tiene del elemento en sus diferentes formas químicas como amoníaco y óxidos durante el proceso de elaboración del biochar (McLaughlin *et al.*, 2009).

Los hidrocarburos formados durante la carbonización son los compuestos orgánicos volátiles (COV), que incluyen compuestos orgánicos alifáticos, como aldehídos, furanos y cetonas, y compuestos orgánicos aromáticos, como el tolueno, el fenol y el benceno (Spokas *et al.*, 2011), además de los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), como el naftaleno y el antraceno (Fabbri *et al.*, 2013). En general, cuando la producción del biochar es bajo condiciones de temperaturas altas y tiempos de residencia largos reducen la concentración de estos compuestos (Spokas *et al.*, 2011; Hale *et al.*, 2012).

1.4. Producción de biochar

Los procesos de carbonización de la biomasa por el cual se obtiene el biochar son diversos, principalmente se toman en consideración las tecnologías que transforman la biomasa en fuentes de energía renovable (Laird *et al.*, 2010).

La pirólisis es una de las muchas tecnología para producir energía a partir de biomasa y consta de un proceso donde la materia orgánica se descompone a altas temperaturas y sin presencia de oxígeno (Bridgwater, 2003), siendo este proceso la primera fase antes de generarse la combustión y gasificación, finalmente el proceso finaliza con la oxidación total o parcial de la biomasa (Klug, 2012) lo cual resulta en un subproducto compuesto de altas cantidades de carbono, el cual se conoce como biochar (Lehmann, 2007).

En el proceso de la pirólisis, se pierde biomasa, generalmente en forma de compuestos orgánicos volátiles, lo cual se traduce en una significativa reducción del volumen, mientras que el compuesto mineral y carbono formado conserva la porosidad y la estructura de la biomasa inicial (Downie *et al.*, 2009).

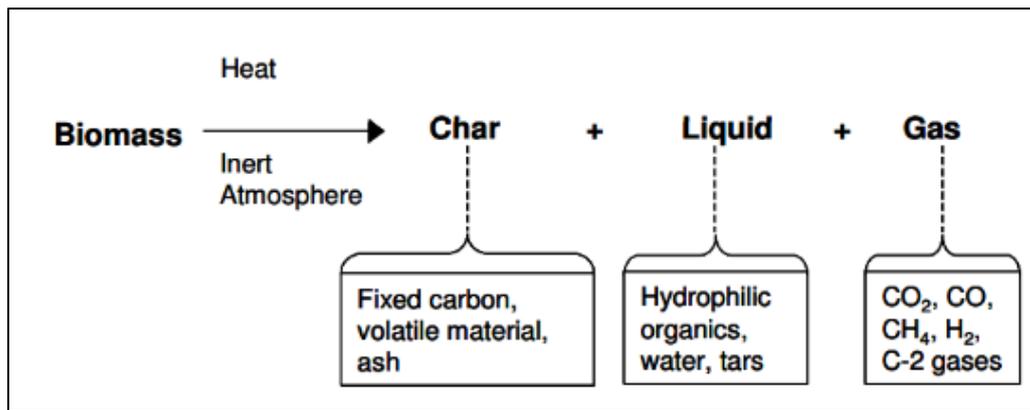


Figura 2. Representación simple del proceso de pirolisis. Fuente: (Brownsort, 2009)

El proceso de producción puede ser por pirólisis lenta, rápida o gasificación. Cada tipo de proceso se distingue por tener diferentes gamas de temperatura (Antal, 2003), usando una gran variedad de diferentes diseños de reactores (Lehmann, 2007).

- Pirólisis rápida

Es un proceso que consta con altas velocidades de calentamiento y corto tiempo de residencia de vapor. Esta requiere generalmente una materia prima previamente dispuesta en pequeñas dimensiones de partículas y un diseño que remueva rápidamente los vapores de la presencia de los sólidos calientes. Existen diversas configuraciones de reactores que pueden conseguir esto incluyendo sistemas ablativos, lechos fluidizados, agitados o camas móviles y sistemas de pirólisis al vacío. Este proceso utiliza una temperatura moderada (en términos de pirólisis) generalmente alrededor de 500 ° C (Brownsort ,2009).

- Pirólisis Lenta

La pirólisis lenta se puede dividir en la producción de biochar y otros procesos más modernos. Este proceso consta por utilizar velocidades de calentamiento más lentas, tiempos de residencia de sólidos y vapores relativamente largos y normalmente a una temperatura más baja que la pirólisis rápida, la cual habitualmente se caracteriza por llegar a 400 ° C. El producto objetivo es a menudo el biochar, pero siempre estará acompañado de productos líquidos y de gas, aunque estos no siempre se recuperan (Brownsort ,2009).

Los procesos tradicionales utilizan pozos, montículos u hornos, generalmente implican cierta combustión directa de la biomasa, usualmente madera, como fuente de calor en el horno (Antal, 2003).

Para la producción enmiendas de suelos a partir de biochar es recomendable utilizar el proceso de pirolisis lenta, debido a que mediante este proceso logramos tener una mayor producción de biochar estable como subproducto (Verheijen, 2010).

El concepto de utilizar la pirólisis para producción de energía y asimismo la utilización del subproducto “biochar” en la agricultura representa una oportunidad de que millones de Tn de CO₂ producidas por las industrias, sean capturadas para restaurar el contenido valioso de carbono en el suelo (Day *et al.*, 2004).

Las materias primas que pueden ser utilizadas en la pirolisis a una escala comercial o de investigación incluyen astillas de madera, corteza de árboles, residuos de cultivos (como la paja, cáscaras de frutos secos y cáscara de arroz), residuos orgánicos, incluyendo granos de destilería, el bagazo de la caña de azúcar entre otros (Yaman, 2004). La pirólisis a una temperatura mayor a 350°C permite la eliminación de patógenos

presentes en abonos de origen animal o en lodos de depuradora, aunque dichos lodos y algunos residuos industriales son evitados como insumos por contener metales pesados (Lehmann *et al.*, 2009).

- Horno tipo Kon tiki

Si bien existen diferentes reactores de gran variedad de diseños para la producción de biochar, un desarrollo reciente ha sido la introducción del horno tipo Kon-Tiki, diseñado en el año 2014 en Suiza y que se está extendiendo rápidamente en más de 50 países (Schmidt y Taylor, 2014)

El principio del horno tipo Kon-Tiki consiste en pirolisar la biomasa capa por capa en un horno de metal formado conicamente (Figura 3), en el cual se inicia el fuego dentro del horno, y las brasas se extienden a lo largo del horno. El gas de pirólisis ascendente es atrapado en las llamas y reacciona con el aire de combustión que entra en el horno desde la parte superior (Schmidt *et al.*, 2015).

El biochar debajo de la capa de pirólisis superior está protegido del acceso de oxígeno por la cortina de fuego que se genera. La zona de combustión forma así una cortina de llama que protege el biochar subyacente de oxidar y quema de manera limpia todos los humos y gases de pirólisis a medida que pasan a través de este frente de fuego caliente (Cornelissen *et al.*, 2016).

Así mismo según la investigación de Cornelissen *et al.*, (2016) en este tipo de horno se puede producir biochar de diversas materias primas cumpliendo con los estándares internacionales de calidad como IBI (Iniciativa Internacional de Biochar) y EBC

(Certificado Europeo de Biochar) y las emisiones de gas y aerosoles que generan son muy bajas.

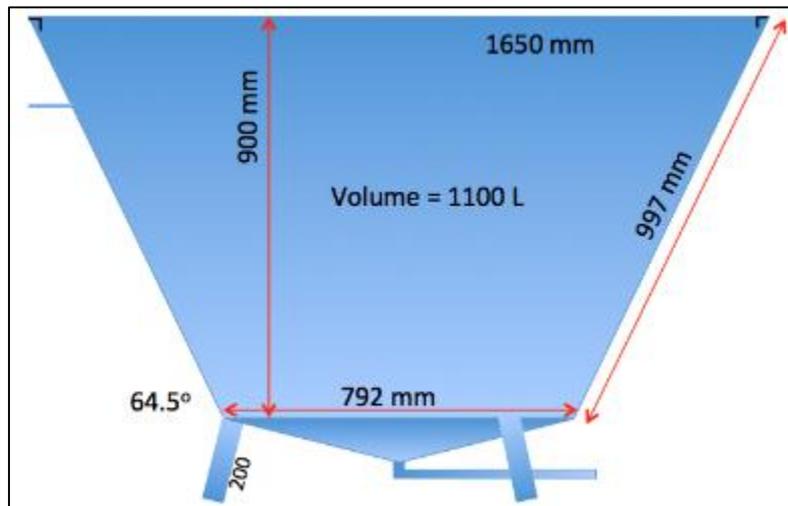


Figura 3. Diseño de horno tipo con tiki para la elaboración de biochar. Fuente: (The biochar revolution, 2014)

1.5. Uso del biochar en la agricultura

Se ha evidenciado que la aplicación de biochar como enmienda en suelos utilizado para la agricultura beneficia a las propiedades del mismo (Sohi *et al.*, 2019; Lehmann *et al.*, 2011; Ahmad *et al.* 2014).

Siendo de los beneficios más relevantes la capacidad de incrementar el número de poros del suelo, teniendo como resultado una mayor capacidad de infiltración y permeabilidad (Ulyett *et al.*, 2014), lo cual permite un mejor desarrollo de las raíces y respiración microbiana (Laird *et al.*, 2010).

A su vez genera un beneficio en términos de rendimiento del cultivo, debido a la contribución de nutrientes (Xu *et al.*, 2014) y así mismo mejorando la capacidad de intercambio catiónico (CIC) del suelo, lo que beneficia a la retención de nutrientes e impide pérdidas de estos del sistema planta-biochar-suelo (Major *et al.*, 2009; Yao *et al.*, 2012).

Cabe señalar que se evidencia una mejor disponibilidad de nutrientes en el suelo gracias al efecto del biochar, debido a que genera variaciones sobre el pH y las condiciones redox y más aún importante s sobre la actividad biológica del mismo (Xu *et al.*, 2009). Por otro lado la característica de color oscuro que suele tener el biochar amerita al suelo una absorción de las radiación solar generando un incremento de su temperatura (Genesio *et al.*, 2012). Lo cual resulta en una reducción de la humedad, sin embargo esto es equilibrado gracias la alta capacidad de retención de agua del biochar (Laird *et al.*, 2010; Genesio et al. 2012), todo lo antes mencionado concluye que el biochar puede generar buenas condiciones para la germinación de semillas (Downie et al. 2009), el desarrollo y el rendimiento de cultivos (Glaser *et al.*, 2002).

Adicionalmente el aporte que el biochar genera en función a la disponibilidad de nutrientes permite obtener un rendimiento del cultivo optimo haciendo uso una menor cantidad de fertilizantes (Sohi *et al.*, 2009). En efecto se estima haciendo uso de una fórmula adecuada de biochar según tu cultivo se puede obtener un incremento en el rendimiento de hasta un 300% (Maia *et al.*, 2011).

Como se ha mencionado, la disponibilidad de los nutrientes varían en un amplio rango, como es el caso del nitrógeno, siendo más abundante en biochars derivados de

estiércoles y lodos de depuradora que en biochar lignocelulósicos; sin embargo, solo una cantidad trivial del contenido total de nitrógeno se encuentra biodisponible (Ippolito *et al.*, 2015). Por este motivo el biochar actúa como un complemento al uso de abonos y fertilizantes (Steiner *et al.*, 2007), implicando un uso más eficiente de insumos nitrogenados como el sulfato de amonio ((NH₄)₂SO₄) y el nitrato de potasio (KNO₃) (Widowati & Asnah, 2014).

Con los beneficios antes mencionado se ha demostrado el incremento del rendimiento de una amplia gama de cultivos como rábano (*Raphanus sativus*) (Chan *et al.*, 2008), arroz (*Oryza sativa*) (Zhang *et al.*, 2012), tomate (*Solanum lycopersicum*) (Akhtar *et al.*, 2014), nabo (*Brassica napus*), camote (*Ipomoea batatas*) (Liu *et al.*, 2014), lechuga (*Lactuca sativa*) y col (*Brassica chinensis*) (Carter *et al.*, 2013).

2. Residuos verdes

El término de residuos verdes se define como la parte vegetativa de los desechos procedentes de diversas fuentes, incluidos los residuos domésticos, comerciales y municipales (EPA, 2009) también llamado “green waste” refiere a la poda de plantas y recortes de césped recogida de parques, jardines y campos agrícolas que tradicionalmente han sido eliminados por incinerador y finalmente vertidos a rellenos sanitarios (Chan *et al.*, 2007). Sin embargo estos residuos de origen urbano provenientes del sector público y/o privado pueden ser reciclados para dar lugar a productos que se pueden generar un aporte en los suelos (Gedesma, 2007).

Se estima que en Lima Metropolitana se generan alrededor 2,534 Tn de residuos verdes de origen domiciliario (SIGERSOL, 2015) (Anexo 26), de los cuales solo algunos distritos de Lima reciclan dichos residuos a una escala muy baja ya sea realizando compost y/o fertilizantes orgánicos como parte de su sistema de gestión de residuos sólidos.

3. Nitrógeno

3.1. Ciclo del Nitrógeno

Ningún otro elemento esencial para la vida toma tantas formas en el suelo como el nitrógeno (N), debido a sus nueve formas químicas diferentes que presenta, correspondiente a sus diferentes estados oxidativos, siendo el N molecular (N_2) el de mayor proporción ya que comprende el 79% de nuestra atmósfera (Robertson & Groffman, 2007), debido a esto el N se presenta como uno de los nutrientes críticos para la supervivencia de todos los organismos vivos, por tal motivo se convierte en un recurso escaso y a menudo, un limitante de la productividad primaria de varios ecosistemas, dado que metabólicamente no está disponible para la asimilación de las plantas (Philippot y Germon, 2005).

El N orgánico presente en el suelo no se encuentra disponible para las plantas, su absorción se da siempre y cuando este elemento se transforme en N inorgánico, como nitrato (NO_3^-), amonio (NH_4^+) y nitrito (NO_2^-) (Perdomo & Barbazán, 2010), Los procesos que permiten obtener la disponibilidad del N para la planta siendo un elemento inorgánico se da mediante la fijación del N atmosférico, mineralización, nitrificación,

desnitrificación y oxidación anaeróbica del amonio, que se desarrollan según la dinámica del N (Figura 4) (Ceron & Aristizábal, 2012).

El nitrógeno se integra al suelo como parte de un proceso natural proveniente de la atmósfera y posterior a esto se vuelve disponible para los productores primarios (autótrofos) mediante la fijación biológica, utilizando la enzima nitrogenasa para catalizar la conversión del nitrógeno atmosférico (N₂) a amoníaco (NH₃), siendo la reacción química (Bernhard, 2010):

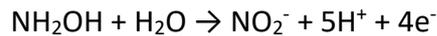
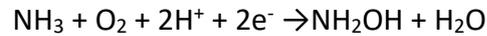


Entre los procariotas fijadores se incluyen organismos como las cianobacterias, bacterias de vida libre del suelo como *Azotobacter*, así mismo bacterias que forman relaciones asociativas con las plantas como *Azospirillum*, y principalmente bacterias que forman simbiosis con leguminosas y que habitan en los nódulos de sus raíces como *Rhizobium* y *Bradyrhizobium* (Wagner, 2011). Así mismo la transformación a amonio, se da mediante la mineralización del amoníaco, teniendo la capacidad de ser asimilado por la plantas (Philippot y Germon, 2005).

Posteriormente, mediante un proceso de oxidación llamado nitrificación el amoníaco (NH₃) es transformado en nitrato (NO₃⁻), la mayoría de los procesos de nitrificación ocurren aeróbicamente y se realiza exclusivamente por procariotas y se distinguen dos pasos:

- La oxidación del amoníaco a nitrito (NO₂⁻), que es llevada a cabo por bacterias oxidantes de amoníaco, como *Nitrosomonas* spp., que convierten el amoníaco

en hidroxilamina (NH₂OH) por medio de la enzima amoniaco monooxigenasa, y que continuamente oxidan la hidroxilamina en nitrito por medio de la enzima hidroxilamina oxidorreductasa, siendo las reacciones químicas(Prosser, 2005):



- La oxidación de nitrito (NO₂⁻) a nitrato (NO₃⁻), realizada por bacterias oxidantes de nitrito, como *Nitrobacter* spp., por medio de la enzima nitrito oxidorreductasa, siendo la reacción química (Prosser, 2005) :



Mediante el proceso de desnitrificación, los nitratos en el suelo se volatilizan y el nitrógeno vuelve a la atmósfera mediante el cual se da la reducción de nitratos o nitritos a nitrógeno molecular (N₂) bajo condiciones anaeróbicas, la desnitrificación se da gracias diverso de los procariotas y eucariotas. Entre ellos se incluyen especies de los géneros *Bacillus*, *Paracoccus*, y *Pseudomonas*. La desnitrificación puede emitir monóxido de nitrógeno (NO) y el óxido nitroso (N₂O) como productos gaseosos intermediarios. El proceso es catalizado por medio de las enzimas nitrato reductasa, nitrito reductasa, óxido nítrico reductasa y óxido nitroso reductasa, siguiendo la secuencia (Prosser, 2005), siendo la reacción química:



De esta manera, el amoníaco (NH_3) puede ser reducido a nitrito (NO_2^-) y seguir la secuencia hasta (N_2) a través del proceso de desnitrificación (Wrage *et al.*, 2001). Así mismo el proceso de Anammox (oxidación anaeróbica de amoníaco) oxida el amoníaco usando nitrito como aceptor de electrones para producir nitrógeno gaseoso.

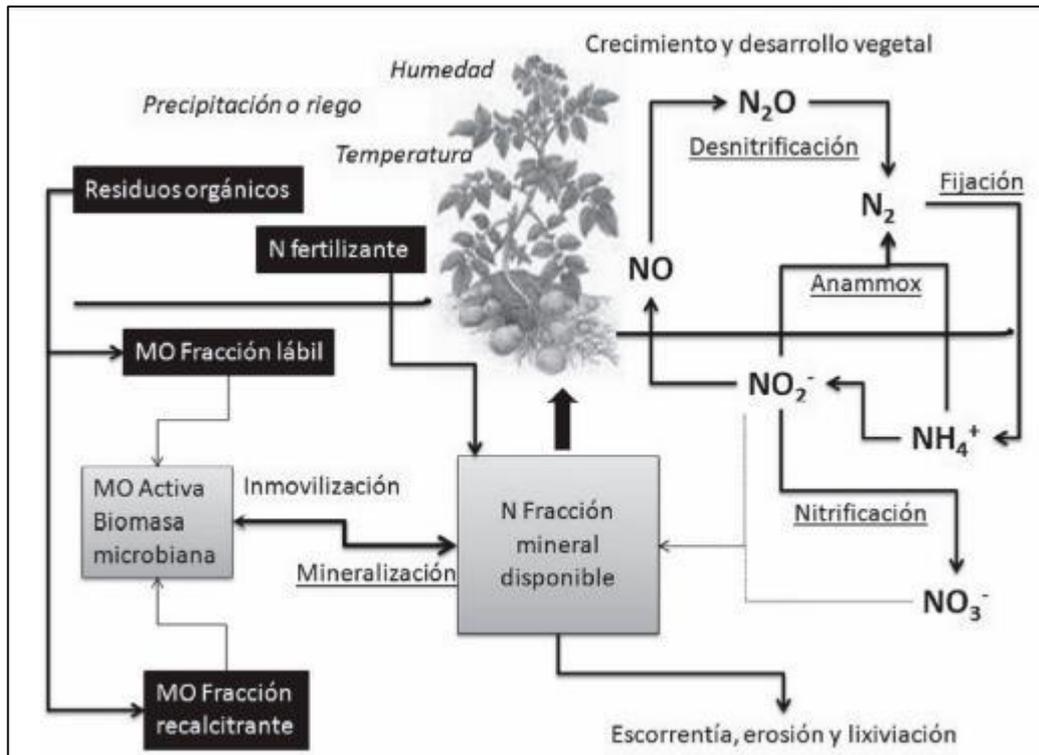


Figura 4. Esquema del ciclo del N. Fuente: (Ceron & Aristizábal, 2012).

3.2. Balance de Nitrógeno

La definición de balance es cuando se determina la diferencia entre el total de nutrientes que entran menos lo que se exporta del sistema planta-suelo. En general, estos se determinan para el área de suelo donde se desarrollan las raíces, lo cual nos permite

valorar los nutrientes de una parcela, teniendo en cuenta la cantidad de nutrientes previo durante y posterior a la cosecha (González & Pomares, 2008).

Como ingresos y/o fuentes de nutrientes en el suelo se tienen los fertilizantes, abonos orgánicos aplicados recientemente y los preexistentes de otros periodos agrícolas, para el ingreso del nitrógeno es mediante la fijación de N_2 del N atmosférico (González & Pomares, 2008).

Así mismo se consideran las cantidades iniciales de N en el suelo, dado que la presencia de este elemento en el suelo se encuentra en formas orgánicas e inorgánicas, las formas orgánicas representan del 90 al 92%, mientras que las inorgánicas sólo llegan a representar del 8 al 10% (Orozco, 1999). De los cuales solo el 2 % se encuentra en forma de nitratos (NO_3^-), amonio (NH_4^+) y nitritos (NO_2^-).

Adicionalmente otra forma de ingreso de N en el balance es el N mineralizado, debido a que gran parte N que asimilan las plantas deriva del N mineralizado a partir de la materia orgánica (Perdomo & Barbazán, 2010) es así que el 5% de N total se encuentra en la materia orgánica del suelo (Graetz, 1997).

Los nutrientes exportados pueden ser estimados a partir de las concentraciones de que absorben los cultivos hasta su cosecha, adicionalmente la pérdida más relevante de nutrientes se da por la lixiviación producto de lluvias y riegos del cultivo que generan el lavado de los nutrientes del suelo por el agua infiltrada y posteriormente son transportados a los ríos y mares. Este tipo de pérdida es manejable a través del aprovechamiento de los procesos biológicos naturales de fijación del nitrógeno, así mismo un eficiente riego (González & Pomares, 2008).

3.3. Fertilizantes Nitrogenados

Para obtener una rentabilidad de las parcelas agrícolas es necesario tener un buen suministro de N disponible para los cultivos. Por lo general los suelos requieren un suministro de N para poder cumplir con la demanda nutricional de los cultivos. Estos es suplido por los fertilizantes que son producidos a partir de en procesos químicos generados de manera industrial o si no pueden provenir de fuentes orgánicos como es el caso de los abonos de origen animal.

A nivel mundial su empleo se ha vuelto más popular durante las últimas décadas. Se estima que la demanda mundial de fertilizantes nitrogenados aumentó de 110,904 millones de Tn en 2014 a 112,539 millones de Tn en 2015, proyectándose alrededor de 118,222 millones de Tn para el 2019 a un crecimiento anual del 1,24%, siendo el 61.4% de la demanda de Asia, 19.8% de América, 13.6% de Europa, un 3.6% de África y 1.6% de Oceanía (FAO, 2016).

Para el Perú la importación de fertilizantes (1993 - 2013) se incrementó de 656 447 Tn a 905 798 Tn, siendo de mayor demanda los fertilizantes nitrogenados, como el caso de la urea, que para el año 2013 su demanda fue de 365 085 Tn (INEI, 2014), así mismo en el 2015 se importaron 424.3 mil Tn de urea equivalentes a \$135,7 millones de dólares (Koo, 2016).

Los principales fertilizantes nitrogenados son:

La urea, fuente de nitrógeno más popular que cuenta con el 56% del mercado global, el cual posee mayor concentrado de N, debido a esta compuesto por 46% de N en forma amídica, asimismo está compuesta por moléculas biuret ($\text{NH}_2\text{-CO-NH-CO-NH}_2$) que se

originan durante la síntesis de la urea, sin embargo esta suele ser toxica para los cultivos, por lo tanto se sugiere no usar urea que tengan contenido superiores al 1.5-2.0% de biuret (Perdomo & Barbazán, 2010).

El nitrato de amoníaco, es uno de los productos con mayor solubilidad, contiene 34.5 % de N. El nitrato de cálcico, producto de alta solubilidad, contiene 15.5% de N, entre otros como los fosfatos de amoníaco, fertilizantes NK y fertilizantes NPK (IFA, 2013).

Los efectos negativos del uso de fertilizantes nitrogenados radica en la baja eficacia de la adsorción de nitrógeno que tienen los cultivos, que va entre 25 a 50%, por lo que se requiere de un mayor empleo de fertilizantes nitrogenados (Chesworth, 2008). A su vez el uso constante de estos, tiene como consecuencia concentraciones significativas de nutrientes presentes en el escurrimiento de los suelos agrícolas, particularmente el nitrógeno (N) y en menor medida el fósforo (P), los cuales son elementos clave de la contaminación de fuentes no puntuales de cuerpos de agua. Debido a su naturaleza soluble en agua, el nitrato (NO_3^-) se mueve fácilmente con el escurrimiento superficial que llega hacia los ríos o con el agua que percola a través del perfil del suelo, la cual puede llegar al agua subterránea. Esta situación es agravada por cambios de uso del suelo, así como el crecimiento demográfico (Khan y Mohammad, 2014).

4. Sondas simuladoras de raíces (PRS®)

Las sondas PRS® (Plant Root Simulator) son membranas de resina de intercambio de iones dispuestas en soportes de plástico que se insertan en el suelo para medir el suministro de iones in situ. Esta tecnología ha sido desarrollada por la empresa canadiense Western Ag Innovations, con el objetivo de que sea utilizada para investigación agronómica, forestal y ecológica (Western Ag, s.f.a).

Cuando son enterradas entre raíces de plantas, las sondas proveerán una tasa neta de suministro de nutrientes; es decir, la diferencia entre el suministro de nutrientes total en el suelo y la captura de las plantas, midiendo así el excedente de nutrientes (Western Ag, s.f.b).

Existen dos tipos de sondas PRS, sondas de aniones de color naranja que tienen una membrana cargada positivamente con sodio (Na^+) para simultáneamente atraer y adsorber todos los aniones cargados negativamente, y sondas de cationes de color lila que tienen una membrana cargada negativamente con iones bicarbonato (HCO_3^-) para simultáneamente atraer y adsorber todos los cationes cargados positivamente (Western Ag, s.f.a).

La concentración de nitrógeno inorgánico en forma de $\text{NO}_3\text{-N}$ y $\text{NH}_4\text{-N}$ es determinado colorimétricamente usando un sistema de análisis por inyección en flujo automatizado (FIA). Los demás iones de nutrientes que quedan en el eluato se miden utilizando espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS) (Western Ag, s.f.c). La unidad de medida utilizada es μg del nutriente / 10 cm^2 de área de superficie

de membrana de intercambio iónico / tiempo de entierro (24 h, 2 semanas, 4 semanas, etc.) (Western Ag, s.f.d).

5. Cultivo de Rábanos

El rábano es un cultivo hortícola de origen asiático que se cultiva en todo el mundo y pertenecen a la siguiente clasificación (Carrera, 2015):

- Reino: Plantae
- División: Magnoliophyta
- Clase: Magnoliopsida
- Orden: Brassicales
- Familia: Brassicaceae
- Género: Raphanus
- Especie: Sativus

El cultivo del rábano posee las siguientes características particulares:

- Posee una raíz principal y otras raíces más finas a los laterales, así mismo el producto de consumo de dicho cultivo se caracteriza por ser una raíz engrosada y aunque generalmente se le llama raíz carnosa (para la presente investigación el término usado para hacer referencia a esta raíz carnosa es *fruto*). Dependiendo de la variedad, la raíz comestible se extiende en forma de esférica a larga y cilíndrica o ahusada y la piel externa puede ser blanca, amarilla, rosada, roja, morada o negra. Los rábanos varían en tamaño de algunos gramos en las

variedades americanas y europeas tempranas más populares de la mayoría hasta 1 kilogramo (*Encyclopædia Britannica, s.f.*).

- Posee hojas compuestas imparipinnadas con bordes en su mayoría dentados, que poseen vellos, por lo general es un cultivo que forma una roseta basal que emerge de la parte superior de la raíz (Infoagro, 2014)
- Los tallos aparecen generalmente en la primera estación son cilíndrico y con gran presencia de vellos (Infoagro, 2014)
- Posee un brote racimoso con las flores de colores blancos, rosados y violetas
- La raíz carnosa es una silicua indehisciente que se caracteriza por ser lisa y color de poseer por lo general un color rojo fuerte (Infoagro, 2014)
- Dependiendo de la variedad, la raíz comestible se extiende en forma de esférica a larga y cilíndrica o ahusada y la piel externa puede ser blanca, amarilla, rosada, roja, morada o negra. Los rábanos varían en tamaño de algunos gramos en las variedades americanas y europeas tempranas más populares de la mayoría hasta 1 kilogramo (Carrera, 2015).

El rábano se caracteriza por tener una maduración de menor periodo de tiempo comparado con otros cultivos (Miranda & Contreras, 2011), puede variar entre 20 y 70 días, según la variedad (Criollo & García, 2009). El cultivo de rábano acorde a su corto periodo de crecimiento, requiere un balance nutricional óptimo lo cuales van entre: 40 – 100 Kg/ha de P_2O_5 y 70- 140 Kg/ha de K_2O (Carrera, 2015), en el caso de la fertilización en dosis de nitrógeno varía entre 100 y 250 kg/ha, obteniendo respuestas de mejoran en el crecimiento vegetativo y el desarrollo de la raíz tuberosa; no obstante, en las dosis de 240 y 250 kg/ha se encontró un alto contenido de nitrato en la planta y en especial

en la raíz tuberosa lo que es perjudicial para la salud humana (Jilani *et al.*, 2010; Baloch *et al.*, 2014; Yuan *et al.*, 2014). En general, los rangos óptimos se encuentran entre 100 y 150Kg/ha (Pervez *et al.*, 2004). Se han evaluado dosis más bajas (50 y 60Kg/ha) pero estas han disminuido significativamente el rendimiento del rábano (Baloch *et al.*, 2014; Yuan *et al.*, 2014).

El valor nutricional del rábano como alimento es importante debido al contenido de azufre que posee, que básicamente es una gran fuentes de antioxidantes para una dieta balanceado, así mismo nos ayuda a prevenir enfermedades (Eroski, 2011).

El rábano como cultivo es utilizado en los experimentos de biochar debido a que es una hortaliza de fácil crecimiento, adaptación y presenta un contacto directo entre el sustrato y la parte comestible, además es utilizado como indicador para evaluar compost, acondicionadores de suelo y mulch (Standards Australia, 2003).

6. Área foliar específica (SLA)

El área foliar total de las plantas es una variable que se relaciona directamente con la cantidad de clorofila que poseen las plantas, por esta razón es un indicador de la capacidad de la planta de sintetizar materia seca, lo cual nos permite saber la producción vegetativa total de la planta (Teruel 1995, Costa 1999, Campostrini y Yamanishi 2001), así mismo este parámetro ha sido objeto de interés en los estudios de fisiología vegetal y genética (Arjona, 2003).

El parámetro vegetal de área foliar específica (m^2/g) o SLA por sus siglas en inglés que Specific leaf area (Enriquez *et al.*, 2004), se define como la relación entre la área foliar y

el peso de la hoja (Hunt, 1990), o en la medida de la foliosidad de la planta con relación al peso seco del mismo (Beadle, 1988).

Así mismo el SLA es un parámetro importante de determinar debido a su aporte al parámetro del área foliar y uso fotosintético del nitrógeno (N) de manera eficiente, (Bultynck *et al.*, 1999). En el proceso de crecimiento el contenido de N en las plantas, se ve afectado por una reducción de su concentración, lo cual tiene una alta relación con la acumulación de materia seca para cualquier estadio de crecimiento del cultivo (Lemaire *et al.*, 1991).

III. OBJETIVOS/HIPÓTESIS

1. Objetivos

1.1. *Objetivo principal*

Evaluar el flujo de nitrógeno en los tratamientos de biochar de residuos verdes y purín de cerdo para el cultivo de tres cosechas de rábano (*Raphanus sativus* L.) en Lurín, Perú.

1.2. *Objetivo específicos*

- a. Determinar el nitrógeno total en el suelo antes y al finalizar los tres ciclos del cultivo para cada tratamiento.
- b. Determinar el nitrógeno total en las muestras de hojas del cultivo de rábano (*Raphanus sativus* L.) en los tres ciclos del cultivo para cada tratamiento.
- c. Determinar la cantidad de nitrógeno perdido en cada tratamiento para cada ciclo del cultivo.

2. Hipótesis

Ho:

Los tres tratamientos que utilizan biochar a base de residuos verdes y purín de cerdo incrementarán la retención del % nitrógeno dentro del sistema productivo del cultivo de tres cosechas de rábano (*Raphanus sativus* L.) en Lurín, Perú.

Ha:

Los tres tratamientos que utilizan biochar a base de residuos verdes y purín de cerdo no incrementarán la retención del % nitrógeno dentro del sistema productivo del cultivo de tres cosechas de rábano (*Raphanus sativus* L.) en Lurín, Perú.

IV. METODOLOGÍA

La producción de biochar y el montaje del experimento se llevaron a cabo en un terreno dedicado a la agricultura, en el Lote 1 Parcela D Buena Vista ubicado en el distrito de Lurín, con coordenadas (N 8644919.92, E 296151.21).

Las actividades de laboratorio se realizaron en las instalaciones de la Universidad Científica del Sur (UCSUR), ubicada en el distrito de Villa El Salvador, así mismo en la Universidad Agraria La Molina (UNALM), ubicada en La Molina, Lima y se mandaron muestras al Laboratorio de Ambiental del Departamento de industrias primarias de Western Ag Innovations en Saskatoon, Canadá.

1. Área de estudio

En distrito de Lurín está ubicado en zonas costeras al sur de Lima, está entre los 0 msnm llegando hasta los 380 msnm, se caracteriza por tener un clima no muy húmedo llegando a tener un promedio 18 °C de temperatura (CODISEC, 2016).

Actualmente posee una superficie territorial de 181,12 km² y cuenta con una población de 85, 132 habitantes (INEI, 2015); Lurín tiene límite con los siguientes distritos Pachacámac, Villa María del Triunfo, Villa El Salvador y de Punta Hermosa.

Así mismo el distrito está compuesto por Villa Alejandro, Julio C. Tello, Huertos de Lurín, Lurín cercado y Km.40; ubicado a un altitud 10 msnm cuenta con una extensión de 200 km² (Municipalidad de Lurín, 2015).

Al ser un distrito rural y urbano cuenta con actividades agropecuarias que generan residuos de los cuales el 2.18% está conformado por residuos verdes (madera y follaje), considerando un 0.5% como generación per cápita (SIGERSOL, 2015).

2. Materiales

Los materiales empleados en el montaje del experimento fueron los siguientes:

2.1. *Biochar*

El biochar se elaboró en las instalaciones de Lurín, el 5 de febrero del 2016, utilizando los siguientes insumos:

- Los residuos verdes estaban compuestos por un conjunto de césped seco, ramas, hojas, paja y pedazos de madera. Estos residuos fueron provenientes de la poda de las zonas agrícolas aledañas al área de estudio.

Los residuos verdes fueron acopiados a la intemperie para ser secados al sol por un periodo de tres semanas, posterior a eso fueron utilizados para la producción de biochar.

- El purín de cerdo fue provisto por la misma granja ubicada en la zona donde se montó el experimento. Así mismo fue expuesto a la intemperie para ser secado al sol por un periodo de tres semanas y posterior a eso fue utilizado para la producción de biochar.

2.2. Fertilizante

El fertilizante seleccionado para el experimento fue urea en su forma granulada ($\text{CO}/\text{NH}_2)_2$), con las siguientes características (Tabla 1):

Tabla 1. Ficha técnica de la urea granulada.

Parámetro	Unidad	Cantidad
Nitrógeno total	%	46 (+/-1)
Contenido de biuret	%	<1

Fuente: Yara, 2015.

2.3. Ácido Fosfórico

Se utilizó ácido fosfórico al 85% para el experimento, con las siguientes características (Tabla 2):

Tabla 2. Ficha técnica del ácido fosfórico.

Parámetro	Unidad	Cantidad
H_3PO_4	%	85 min.
P_2O_5	%	61.6 min.
Gravedad Especifica	g/cm^3	1.685
Color	(APHA)	30 máx.

Fuente: Aquaquimi, 2015.

2.4. Semillas

El cultivo seleccionado para el experimento fue el rábano (*Raphanus sativus* L.) variedad Crimson Giant, en la presentación de 500 gr de la marca Alabama, se utilizaron inicialmente 6 semillas por tubo de exclusión y posterior a la germinación se dejó solo 3 plántulas de rábano.

2.5. Sondas simuladoras de raíces de plantas (PRS)

Se utilizaron 360 sondas PRS® para la medición de nitrógeno disponible en el suelo; sondas de aniones para la medición de nitrato y sondas de cationes para la medición de amonio (Anexo 3-a).

3. Metodología

3.1. Diseño experimental

Se implementó un diseño experimental de bloques completamente al azar, con cinco tratamientos:

- T1: control en donde no se aplicó ningún tipo de tratamiento a base de biochar ni fertilizante orgánico.
- T2: fertilizante orgánico a base de purín de cerdo, el cual se utiliza de forma habitual en la zona agrícola de Lurín.
- T3: biochar hecho a base de residuos verdes y purín de cerdo.

- T4: biochar hecho a base de residuos verdes y purín de cerdo, el cual fue modificado a un pH ajustado a neutro con la aplicación de ácido fosfórico (H_3PO_4).
- T5: biochar hecho a base de residuos verdes y purín de cerdo, el cual fue modificado a un pH ajustado a neutro con la aplicación de fosfórico (H_3PO_4) y con un ajuste de concentración de N a base de urea granulada en función al requerimiento nutricional del cultivo.

Cada tratamiento contó con diez repeticiones (Tabla 3)

Tabla 3. Distribución de los cinco tratamientos de acuerdo al diseño experimental de bloques completamente al azar.

| Bloque |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| T2 | T3 | T4 | T4 | T3 | T4 | T5 | T2 | T1 | T2 |
| T3 | T5 | T2 | T1 | T4 | T2 | T1 | T4 | T2 | T1 |
| T4 | T1 | T5 | T2 | T1 | T5 | T4 | T1 | T5 | T5 |
| T5 | T2 | T1 | T3 | T5 | T1 | T3 | T5 | T3 | T3 |
| T1 | T4 | T3 | T5 | T2 | T3 | T2 | T3 | T4 | T4 |

T1: control, T2: Purín de cerdo, T3: Biochar, T4: Biochar con pH ajustado a neutro y T5: Biochar con pH ajustado a neutro con un ajuste de concentración de N a base de urea granulada.

Para este propósito se dispuso de 50 tubos de PVC de 30 cm de longitud y 10 cm de diámetro (Anexo 2-b), los cuales cuentan con un área de 0.0078 m² y fueron ordenados en diez columnas de cinco, los cuales cumplieron la función de tubos de exclusión para aislar las raíces del cultivo de rábano de la competencia de raíces ajenas al experimento, con el fin de poder analizar exclusivamente el suelo y el cultivo que creció en el tubo.

3.2. Producción de biochar

El biochar fue elaborado de la mezcla entre el residuo verde y purín de cerdo bajo la misma proporción (50:50) (Anexo 25) en pirólisis a una temperatura baja entre 350°C a 550°C (Day *et al.*, 2004), en el horno tipo kon tiki ubicado en zona de estudio (Anexo 1).

La carga total de insumos utilizados para la producción de biochar fue de 150 kg de residuos verdes y 150 kg de purín de cerdo; el tiempo de elaboración empleado fue de una hora y media; finalmente se obtuvo 250 kg de biochar. Las muestras de biochar utilizadas en el experimento fueron tamizadas a 2 mm.

Posterior a esto, se utilizó el biochar para la producción de los tratamientos modificados T4 y T5 para los cuales se aplicó ácido fosfórico, con el fin de estabilizar el pH inicial de 10 (Anexo 27-4) a pH neutro para lo cual se aplicó 3 L de ácido fosfórico por cada 250 kg, este producto fue aplicado una vez que el biochar estaba completamente seco, a los cinco días de su producción.

El biochar y el ácido fosfórico fueron mezclados homogéneamente con la ayuda de palas y posterior a eso se procedió a verificar que el pH de la enmienda fuera neutro, estas

mediciones se realizaron a los cinco días, diez días y finalmente el mismo día de su aplicación en el montaje del experimento.

Así mismo para el T5, posterior a su aplicación de ácido fosfórico, se le adicionó urea granulada con el fin de ajustar su contenido de N, para lo cual se aplicó 6 kg de urea granulada por cada 250 kg de biochar y fueron mezclados homogéneamente con la ayuda de palas.

3.3. Estandarización de tratamientos

Para determinar la estandarización de cada tratamiento se aplicaron los siguientes pasos:

Se determinó el % de N inicial para los tratamientos T2, T3, T4 y T5 en el laboratorio de la UNALM, posterior a eso se convirtió el % a unidades de masa (g de N/ kilo de muestra), con la siguiente formula:

$$g. \text{ de N/ Kilo} = \%N \times 10 \dots \dots \dots (a)$$

Se definió la estandarización a 100 kg N/ha de cada tratamiento, aplicando la siguiente formula:

$$Tn \text{ de tratamiento/ ha} = 100/a \dots \dots \dots (b)$$

Así mismo se determinó en unidades de masa (g) la cantidad de cada tratamiento a aplicar en los tubos de aislamiento, donde se cultivara el rábano, considerando el área superficial (7.853×10^{-7} ha), aplicando la siguiente formula:

g. de tratamiento/ tubo = b x área superficial del tubo.....(c)

Adicionalmente para todos los tratamientos se utilizó el valor del peso seco, por lo que se recalcula la cantidad del valor (c) a usarse de acuerdo al porcentaje de humedad determinado en cada tratamiento, según la fórmula:

$$\% \text{ Humedad} = \frac{(P_i - P_f)}{P_i} \cdot 100$$

Donde P_i : peso inicial y P_f : peso final, finalmente se obtiene el valor de (g de abono/ tubo) en peso seco a aplicar en cada tratamiento.

Según la metodología descrita los tratamientos T2, T3, T4 y T5 fueron estandarizados a una tasa de aplicación de 100 kg N/ha según el requerimiento nutricional de las hortalizas y antecedentes de tasas de nitrógeno ya aplicadas para el cultivo de rábano (*Raphanus sativus* L.), con el fin de aplicar la misma cantidad de N de entrada en cada tratamiento.

La tasa establecida se adaptó de acuerdo al diámetro de los tubos, estableciéndose una tasa de (11.86, 14.63, 12.96, 12.87) g/tubo para cada tratamiento correspondiente (Tabla 4). Este es el valor del peso seco de cada tratamiento requerido, sea biochar, fertilizante o biochar mejorado, por lo que se recalcula la cantidad a usarse en cada tubo de acuerdo al porcentaje de humedad determinado.

Tabla 4. Cantidad en (Gramos de tratamiento/tubo) de los cinco tratamientos estandarizados a una tasa de aplicación de 100 kg de N/ha, considerando el % de humedad.

Tratamiento	N (g/g)%	Tn de tratamiento/ha para aplicar 100 kg de N por ha	Gramos de tratamiento por tubo	% humedad	Gramos de tratamiento por tubo con (% humedad)
T1	-	-	-	-	-
T2	0.84	11.90	9.35	26.8	11.86
T3	0.64	15.63	12.27	19.2	14.63
T4	0.64	15.63	12.27	5.6	12.96
T5	0.68	14.71	11.55	11.4	12.87

T1: control, T2: Purín de cerdo, T3: Biochar, T4: Biochar con pH ajustado a neutro y T5: Biochar con pH ajustado a neutro con un ajuste de concentración de N a base de urea granulada.

3.4. Montaje del experimento

Para el montaje del experimento se utilizó una parcela de 2 m de largo x 1 m de ancho (Anexo 2). En esta parcela se dispuso de 50 tubos de PVC los cuales sirvieron de exclusión para el suelo y el cultivo, así mismo los tubos fueron enterrados a 25 cm de profundidad y llenados con suelo propio de la zona, así mismo a cada tubo se le adiciono un tratamiento (Tabla 4).

Al momento de proceder con la siembra, las semillas fueron enterradas a una profundidad de 5 cm, se plantaron seis semillas en cada tubo de exclusión. A los 12 días de la siembra (Tabla 5) se realizó el raleo de semillas posterior a la germinación, para lo cual se dejó 3 semillas por tubo de exclusión.

La parcela fue cubierta por una reja alta como medio de protección, para evitar que los animales de la zona se acercaran a la zona del experimento.

La cosecha de los tres ciclos del cultivo se ejecutó al culminar entre los 64 y 66 días posteriores a la siembra (Tabla 5).

A una semana del término de cada cosecha se procedió a replantar nuevas semillas para el siguiente ciclo, usando 6 semillas al inicio y ralando a 3 semillas, no se realizó ninguna aplicación adicional de abonos y/o fertilizantes (sea aplicados al suelo o por vía foliar) y tampoco algún tipo de plaguicida antes ni durante el crecimiento de los tres ciclos del cultivo (Anexo 4), así mismo el riego del cultivo se realizó por regadera con agua potable a una frecuencia de 0.225 m³/día al área total, todos los días.

Para la cosecha, primero se procedió a retirar las sondas PRS. Luego, las plantas de rábano fueron sacadas desde la raíz, separadas por hojas, tallo, fruto y raíz (Anexo 5) que posteriormente fueron almacenadas en sobres de papel rotulados con el código asignado. Las muestras de rábano fueron pesadas posterior a la cosecha para obtener el peso fresco. El conjunto total de muestras fueron llevadas al laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Universidad Científica del Sur, donde fueron secadas en estufa a una temperatura de 65°C por un periodo de tres días. Y finalmente cada muestra fue pesada para obtener el peso seco. Los frutos de los rábanos secos fueron llevados a la

Universidad Agraria La Molina para determinar el % de N, mediante el método Kjeldahl (A.O.A.C, 1984).

Así mismo, durante la cosecha de cada ciclo del cultivo, se recortó una hoja representativa de cada rábano, registrándose la fecha, el largo de la hoja en (cm) y el escaneando de estas mismas para ser procesadas en el programa IMAGE J. Cada hoja fue recolectada en una bolsa de papel y rotulada con el código asignado, posteriormente llevada al laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Universidad Científica del Sur. Las muestras fueron secadas en una estufa a una temperatura de 65°C por un periodo de 3 días y posteriormente fueron pesadas para obtener su peso seco y llevadas a la Universidad Agraria La Molina, con el fin de determinar el % de N foliar.

Tabla 5. Calendario de siembra, raleo de semillas germinadas, colocación de PRS y cosecha para cada ciclo del cultivo

Ciclo de cultivo	Fecha	Días	Días acumulados
Primer ciclo del cultivo			
Siembra	26/04/2016	0	0
Raleo de semillas germinadas	7/05/2016	12	12
Colocación de PRS	15/06/2016	51	51
Retiro de PRS	29/06/2016	65	65
Cosecha	29/06/2016	65	65
Segundo ciclo del cultivo			
Siembra	3/07/2016	0	69
Raleo de semillas germinadas	16/07/2016	14	82
Colocación de PRS	26/08/2016	56	125
Retiro de PRS	09/09/2016	66	140
Cosecha	09/09/2016	66	140
Tercer ciclo del cultivo			
Siembra	13/09/2016	0	144
Raleo de semillas germinadas	24/09/2016	12	155
Colocación de Sondas PRS	02/11/2016	52	194
Retiro de Sondas PRS	16/11/2016	64	208
Cosecha	16/11/2016	64	208

3.5. Sondas PRS®

Para la medición de nitrógeno disponible en el medio, se utilizaron sondas Plant Root Simulator (PRS®) que fueron enterradas a 10 cm de profundidad en el suelo en cada tubo de exclusión, sin embargo solo se seleccionaron 30 tubos de los 50 tubos en campo para cada ciclo del cultivo, utilizando en total 360 sondas a lo largo de los tres ciclos del cultivo, por lo tanto en cada ciclo del cultivo se dispuso 120 sondas PRS para el cual se colocó 4 sondas (2 de cationes y 2 de aniones) por cada tratamiento de forma aleatoria (Tabla 6, 7 y 8). Las sondas fueron colocadas 2 semanas antes de cada cosecha para los tres ciclos del cultivo.

Luego del tiempo respectivo de la permanencia de las sondas en el suelo, fueron removidas limpiadas y guardadas con un poco de agua para mantener la humedad de las membranas en bolsas Ziploc®. Posteriormente, las sondas fueron enviadas al laboratorio de Western Ag Innovations en Saskatoon, Canadá, para determinar la concentración de nitratos (NO_3^-), y amonio (NH_4^+) en el suelo registrado antes y durante el cultivo por medio del análisis de inyección de flujo (FIA).

Tabla 6. Distribución de las sondas PRS para el primer ciclo del cultivo

| Bloque |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| T2 | T3 | T4 | T4 | T3 | T4 | T5 | T2 | T1 | T2 |
| T3 | T5 | T2 | T1 | T4 | T2 | T1 | T4 | T2 | T1 |
| T4 | T1 | T5 | T2 | T1 | T5 | T4 | T1 | T5 | T5 |
| T5 | T2 | T1 | T3 | T5 | T1 | T3 | T5 | T3 | T3 |
| T1 | T4 | T3 | T5 | T2 | T3 | T2 | T3 | T4 | T4 |

Tabla 7. Distribución de las sondas PRS para el segundo ciclo del cultivo

| Bloque |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| T2 | T3 | T4 | T4 | T3 | T4 | T5 | T2 | T1 | T2 |
| T3 | T5 | T2 | T1 | T4 | T2 | T1 | T4 | T2 | T1 |
| T4 | T1 | T5 | T2 | T1 | T5 | T4 | T1 | T5 | T5 |
| T5 | T2 | T1 | T3 | T5 | T1 | T3 | T5 | T3 | T3 |
| T1 | T4 | T3 | T5 | T2 | T3 | T2 | T3 | T4 | T4 |

Tabla 8. Distribución de las sondas PRS para el tercer ciclo del cultivo

| Bloque |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| T2 | T3 | T4 | T4 | T3 | T4 | T5 | T2 | T1 | T2 |
| T3 | T5 | T2 | T1 | T4 | T2 | T1 | T4 | T2 | T1 |
| T4 | T1 | T5 | T2 | T1 | T5 | T4 | T1 | T5 | T5 |
| T5 | T2 | T1 | T3 | T5 | T1 | T3 | T5 | T3 | T3 |
| T1 | T4 | T3 | T5 | T2 | T3 | T2 | T3 | T4 | T4 |

Las áreas sombreadas en la (Tabla 6, 7 y 8) fueron puntos seleccionados al azar donde se colocaron las sondas PRS.

3.6. Determinación del balance de nitrógeno

La determinación del flujo del nitrógeno dentro del sistema planta-biochar-suelo, se realizó mediante el balance del nitrógeno al finalizar el último ciclo del cultivo, tomando en cuenta las entradas y salidas del sistema suelo-planta (Errebhi *et al.* 1998; Meinsinger *et al.* 2008, Giletto & Echeverría 2013).

Se considera:

$$N \text{ de entrada} = N \text{ de salida}$$

Aplicando la siguiente ecuación:

$$N \text{ entrada} = N\text{-inicial} + N\text{-mineralizado} + N\text{-atmosférico} + N\text{-fertilización}$$

$$N \text{ salida} = N\text{-final} + N\text{-exportado} + N\text{-perdido}$$

Donde:

- N- inicial: Stock inicial de N (kg/ha) que hay en el suelo sin ningún tipo de aplicación de tratamiento.
- N-mineralizado: Stock de N (kg/ha) que hay en el suelo mineralizado a partir del contenido de materia orgánica.
- N-atmosférico: Cantidad de N fijado (kg/ha) por microorganismos presentes en el suelo.
- N- fertilización: Cantidad de N (kg/ha) que se aplica directamente al suelo en cada tratamiento.
- N- final: Stock final de N (kg/ha) que queda en el suelo al finalizar el último ciclo del cultivo.

- N- perdido: Cantidad de N (kg/ha) que se pierde por lavado y/o volatilización
- N- exportado: Cantidad de N (kg/ha) extraído por la biomasa vegetativa en cada ciclo de cultivo.

El balance permite estimar la tendencia del N en el sistema planta-suele (Álvarez, 2006) y así mismo con la ecuación anterior se determina el N perdido:

$$N \text{ perdido} = [N\text{-inicial} + N\text{-mineralizado} + N\text{-fertilización}] - [N\text{-final} + N\text{-exportado}]$$

Las entradas y las salidas de N se calcularon de la siguiente forma:

a. N- entrada

El N- inicial se determinó mediante la fórmula de stock de N (Vásquez *et al.*, 2014):

$$\text{Stock de N en el suelo (Kg.m}^{-2}\text{)} = \text{Nitrógeno (\%)} \times \text{Densidad aparente (Kg.m}^{-3}\text{)} \\ \times \text{profundidad(m)}$$

Para lo cual se calculó la densidad aparente mediante el método del cilindro con un muestreo inicial del suelo a utilizar en el experimento, con la ayuda de un cilindro metálico de volumen conocido (1L) (Gutiérrez, 2010), al mismo tiempo esta fórmula se aplicó para determinar el Stock de materia orgánica, utilizando el dato de % de materia orgánica (Anexo 27-1), para lo cual se considera que la materia orgánica del suelo contiene cerca del 5% de N total (Graetz, 1997), de igual manera las entradas tanto como N-inicial y N-mineralizado fueron finalmente calculados considerando que solo el 2 % del N total se encuentra en formas asimilables para las plantas como amonio cambiante, nitratos y nitritos (Paredes, 2013).

Por otro lado el N-atmosférico, es un dato complejo de estimar, debido a la gran variedad de microorganismos fijadores de N que podemos encontrar en los suelos, para la presente investigación se considera que el suelo previo al primer ciclo del cultivo estuvo lleno de mala hierbas especialmente tipo leguminosas de baja fijación por lo cual se considera que el aporte por fijación de N-atmosférico es (58.8 kg de N.ha⁻¹), el cual fue utilizado para un intercultivo de maíz y caupí para un periodo de 150 días (Ofori *et al.*, 1987). Este dato fue ajustado al tiempo de los tres ciclos del cultivo a (208 días), finalmente se utilizó como dato de N-atmosférico (78.7kg de N.ha⁻¹).

b. N- salida

El N-final del suelo, se calculó al igual que el N-inicial, sin embargo para este caso se utiliza la densidad aparente usando el volumen del cilindro y los diferentes pesos de suelo que hay en cada tubo de exclusión.

El N- exportado, se determinó para cada ciclo de cultivo, utilizando la siguiente formula:

$$N \text{ exportado} = [\text{biomasa vegetativa} \times \text{concentración de Nitrógeno}] /$$

área utilizada por planta

La biomasa vegetativa se considera la suma de la biomasa de las hojas y fruto. El área utilizada en la formula fue 0.0026 m², debido a que es el área inicial del tubo de PVC dividido entre 3, la cantidad de rábanos germinados en cada tubo experimental.

3.7. Análisis

Para cada tratamiento en cada ciclo de los cultivos de rábano, se realizó el análisis mediante la elección de una planta representativa por cada tubo experimental; es decir, se escogieron 50 de 150 plantas en cada ciclo del cultivo al azar. Asimismo, aquellos tubos donde no sobrevivió ninguna planta fueron omitidos del análisis.

Para el análisis estadístico se utilizó el programa JMP® con el que se realizó el análisis de varianza (ANOVA) de una vía a los datos obtenidos, con un valor de $P < 0.05$, seguido de la prueba de Diferencia Significativa Honesta (DSH) de Tukey.

V. RESULTADOS

1. Producción de biomasa

Los parámetros evaluados como la producción del cultivo fueron: biomasa vegetativa total, biomasa del fruto y área foliar específica, como rasgo funcional a través de los tres ciclos del cultivo (Anexo 9, 10 y 11).

1.1. *Primer ciclo del cultivo*

Se determinó mediante el análisis de varianza (ANOVA) que para el primer ciclo del cultivo (65 días), se registraron efectos significativo en la producción de biomasa vegetativa total con un valor de ($P < 0.0004$), así mismo la biomasa del fruto con un valor ($P < 0.0101$) y el área foliar específica con un valor ($P < 0.0174$) (Anexo 15).

Así mismo se determinó mediante la prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$) las diferencias significativas entre los tratamientos para cada parámetro y los subgrupos homogéneos están indicados por la misma letra para el primer ciclo del cultivo (Tabla 9).

Tabla 9. Resultado de las medias y los subgrupos homogéneos indicados por la misma letra, de la producción de biomasa vegetativa total, biomasa del fruto y área foliar específica, para el primer ciclo del cultivo de los cinco tratamientos.

Tratamiento	Biomasa vegetativa total (Tn.ha⁻¹)	Biomasa del fruto (Tn.ha⁻¹)	Área foliar específica (cm².g⁻¹)
T5	6.88 a	2.88 a	134.2 a
T4	4.41 ab	1.71 ab	92.4 a
T3	5.21 ab	1.93 ab	85.9 a
T2	3.81 b	1.24 b	70.2 a
T1	3.43 b	1.14 b	69.9 a

T1: control, T2: Purín de cerdo, T3: Biochar, T4: Biochar con pH ajustado a neutro y T5: Biochar con pH ajustado a neutro con un ajuste de concentración de N a base de urea granulada.

En la (Figura 5) se observa que durante el primer ciclo del cultivo se tiene una tendencia marcada de mayor producción de biomasa vegetativa para los tratamientos que utilizaron biochar (T3, T4 y T5), acorde a la siguiente tendencia: T5>T3>T4>T2>T1; siendo el T5 y T3 con promedios de 6.88 y 5.21 (Tn/ha), (tabla 10), los de mayor producción de biomasa vegetativa.

Por otro lado el área foliar específica, sigue la tendencia de la producción de biomasa vegetativa, siendo mayor para el tratamiento 5, con un promedio de 134.2 (cm²/g).

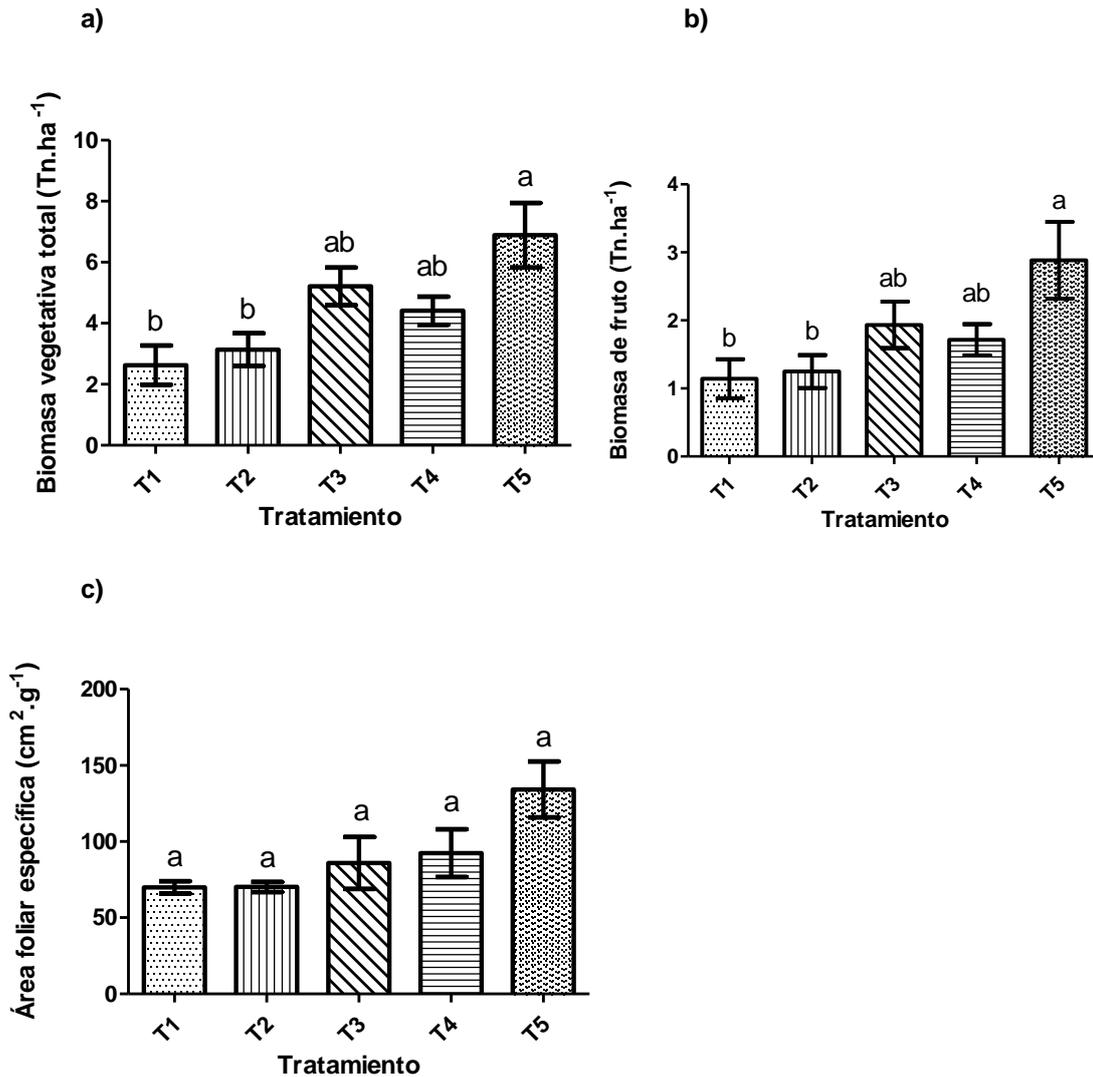


Figura 5. Efecto de los cinco tratamientos sobre la producción: a) Biomasa vegetativa total, b) Biomasa del fruto y c) Área foliar específica, para el primer ciclo del cultivo rábano (*Raphanus sativus* L.).

T1: control, T2: Purín de cerdo, T3: Biochar, T4: Biochar con pH ajustado a neutro y T5: Biochar con pH ajustado a neutro con un ajuste de concentración de N a base de urea granulada.

1.2. Segundo ciclo del cultivo

Se determinó mediante el análisis de varianza (ANOVA) que para el segundo ciclo del cultivo (66 días), se registraron efectos significativos en la producción de biomasa vegetativa total con un valor de ($P < 0.0005$), así mismo la biomasa del fruto con un valor ($P < 0.0156$) y el área específica foliar con un valor ($P < 0.0317$) (Anexo 16).

Así mismo se determinó mediante la prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$) las diferencias significativas entre los tratamientos para cada parámetro y los subgrupos homogéneos están indicados por la misma letra para el segundo ciclo del cultivo (Tabla 10).

Tabla 10. Resultado de las medias y los subgrupos homogéneos indicados por la misma letra, de la producción de biomasa vegetativa total, biomasa del fruto y área foliar específica, para el segundo ciclo del cultivo de los cinco tratamientos.

Tratamiento	Biomasa vegetativa		Área foliar específica ($\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)
	total ($\text{Tn} \cdot \text{ha}^{-1}$)	Biomasa del fruto ($\text{Tn} \cdot \text{ha}^{-1}$)	
T5	5.565 a	2.358 a	147.1 a
T4	3.826 ab	1.117 ab	211.2 a
T3	3.809 ab	1.36 ab	198.03 a
T2	1.69 b	0.53 b	121.3 a
T1	1.082 b	0.307 b	87.9 a

T1: control, T2: Purín de cerdo, T3: Biochar, T4: Biochar con pH ajustado a neutro y T5: Biochar con pH ajustado a neutro con un ajuste de concentración de N a base de urea granulada.

En la (Figura 6) se observa que durante el segundo ciclo del cultivo se tiene una tendencia marcada de mayor producción de biomasa vegetativa para los tratamientos que utilizaron biochar (T3, T4 y T5), acorde a la siguiente tendencia: $T5 > T4 > T3 > T2 > T1$; siendo el T5 con promedio de 5.56 (Tn/ha), (Tabla 11) el de mayor producción de biomasa vegetativa, así mismo el T3 y T4 también poseen una alta producción de biomasa vegetativa, sin embargo comparados entre si no existe una diferencia representativa ya que poseen los siguientes promedios de producción 3.826 y 3.809 (Tn/ha).

Por otro se tiene una mayor área foliar específica en el tratamiento T4 con 211.2 (cm²/g).

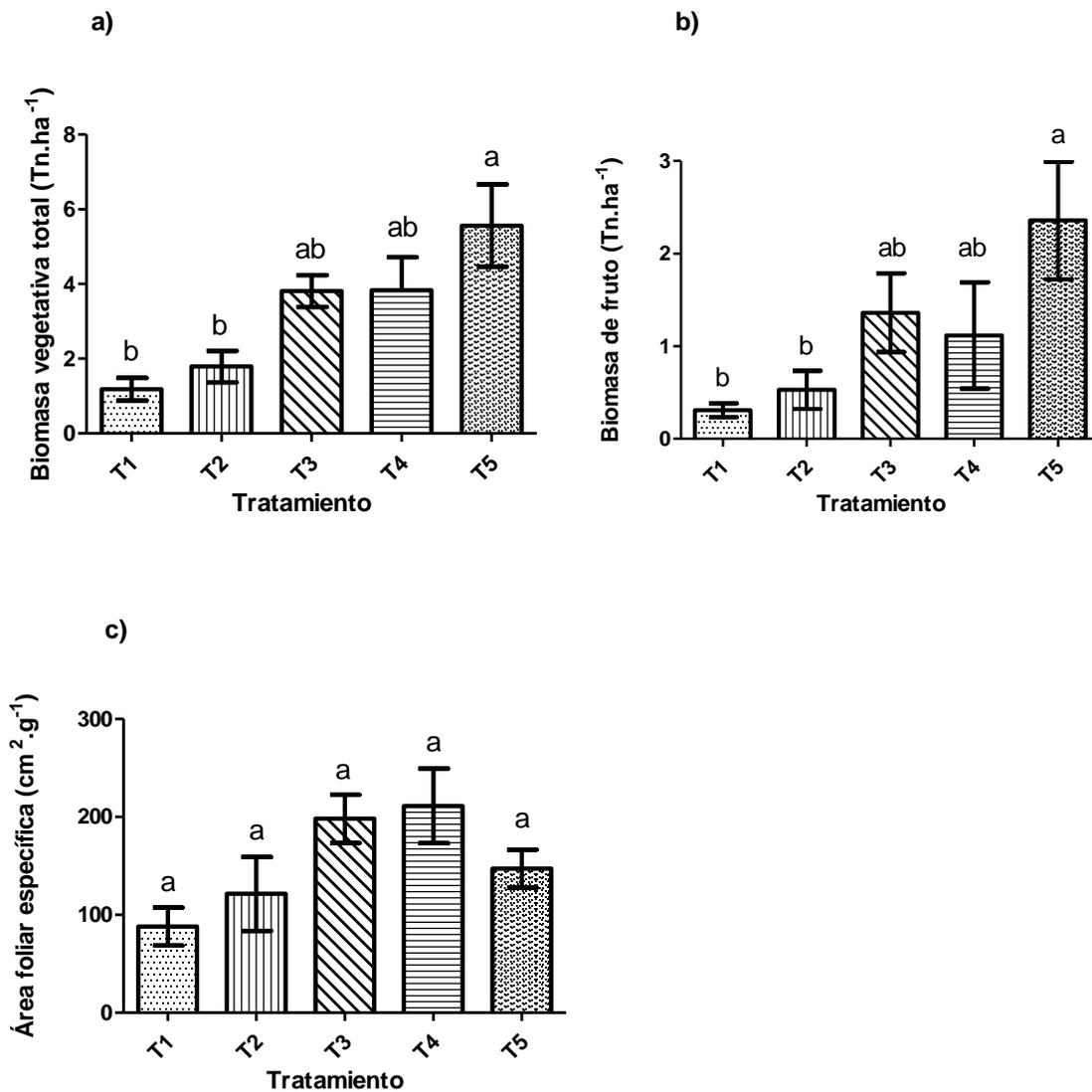


Figura 6. Efecto de los cinco tratamientos sobre la producción: a) Biomasa vegetativa total, b) Biomasa del fruto y c) Área foliar específica, para el segundo ciclo del cultivo rábano (*Raphanus sativus* L.).

T1: control, T2: Purín de cerdo, T3: Biochar, T4: Biochar con pH ajustado a neutro y T5: Biochar con pH ajustado a neutro con un ajuste de concentración de N a base de urea granulada.

1.3. Segundo ciclo del cultivo

Se determinó mediante el análisis de varianza (ANOVA) que para el tercer ciclo del cultivo (64 días), se registraron efectos significativo de los tratamientos sobre la producción de biomasa vegetativa total con un valor de ($P < 0.0001$), así mismo la biomasa del fruto con un valor ($P < 0.0002$) y el área específica foliar con un valor ($P < 0.0406$) (Anexo 17).

Así mismo se determinó mediante la prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$) las diferencias significativas entre los tratamientos para cada parámetro y los subgrupos homogéneos están indicados por la misma letra para el tercer ciclo del cultivo (Tabla 11).

Tabla 11. Resultado de las medias y los subgrupos homogéneos indicados por la misma letra, de la producción de biomasa vegetativa total, biomasa del fruto y área foliar específica, para el tercer ciclo del cultivo de los cinco tratamientos.

Tratamiento	Biomasa vegetativa	Biomasa del fruto (Tn.ha ⁻¹)	Área foliar específica (cm ² .g ⁻¹)
	total (Tn.ha ⁻¹)		
T5	7.769 a	5.503 a	188.6 a
T4	6.455 ab	4.583 ab	160.1 ab
T3	6.521 ab	4.777 ab	156.8 ab
T2	3.039 bc	2.387 bc	67.5 b
T1	2.557 c	1.879 c	45.8 b

T1: control, T2: Purín de cerdo, T3: Biochar, T4: Biochar con pH ajustado a neutro y T5: Biochar con pH ajustado a neutro con un ajuste de concentración de N a base de urea granulada.

En la (Figura 7) se observa que durante el tercer ciclo del cultivo se tiene una tendencia marcada de mayor producción de biomasa vegetativa para los tratamientos que utilizaron biochar (T3, T4 y T5), acorde a la siguiente tendencia: $T5 > T3 > T4 > T2 > T1$; siendo el T5 con un promedio de 7.76 (Tn/ha) (Tabla 11).

Por otro lado el área foliar específica, sigue la tendencia de la producción de biomasa vegetativa, siendo mayor para el tratamiento 5, con un promedio de 188.6 (cm²/g).

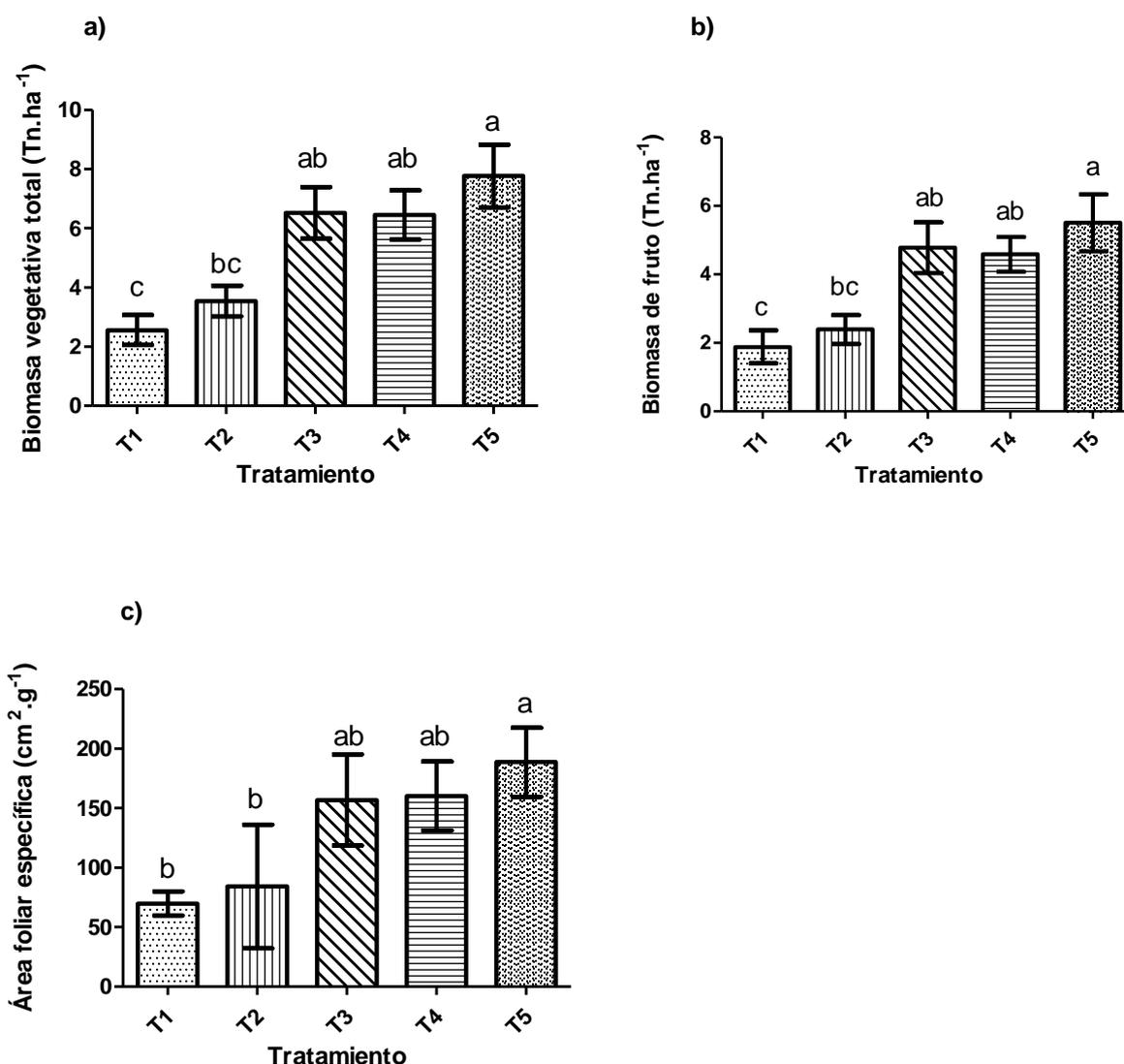


Figura 7. Efecto de los cinco tratamientos sobre la producción: a) Biomasa vegetativa total, b) Biomasa del fruto y c) Área foliar específica, para el tercer ciclo del cultivo rábano (*Raphanus sativus* L.).

T1: control, T2: Purín de cerdo, T3: Biochar, T4: Biochar con pH ajustado a neutro y T5: Biochar con pH ajustado a neutro con un ajuste de concentración de N a base de urea granulada.

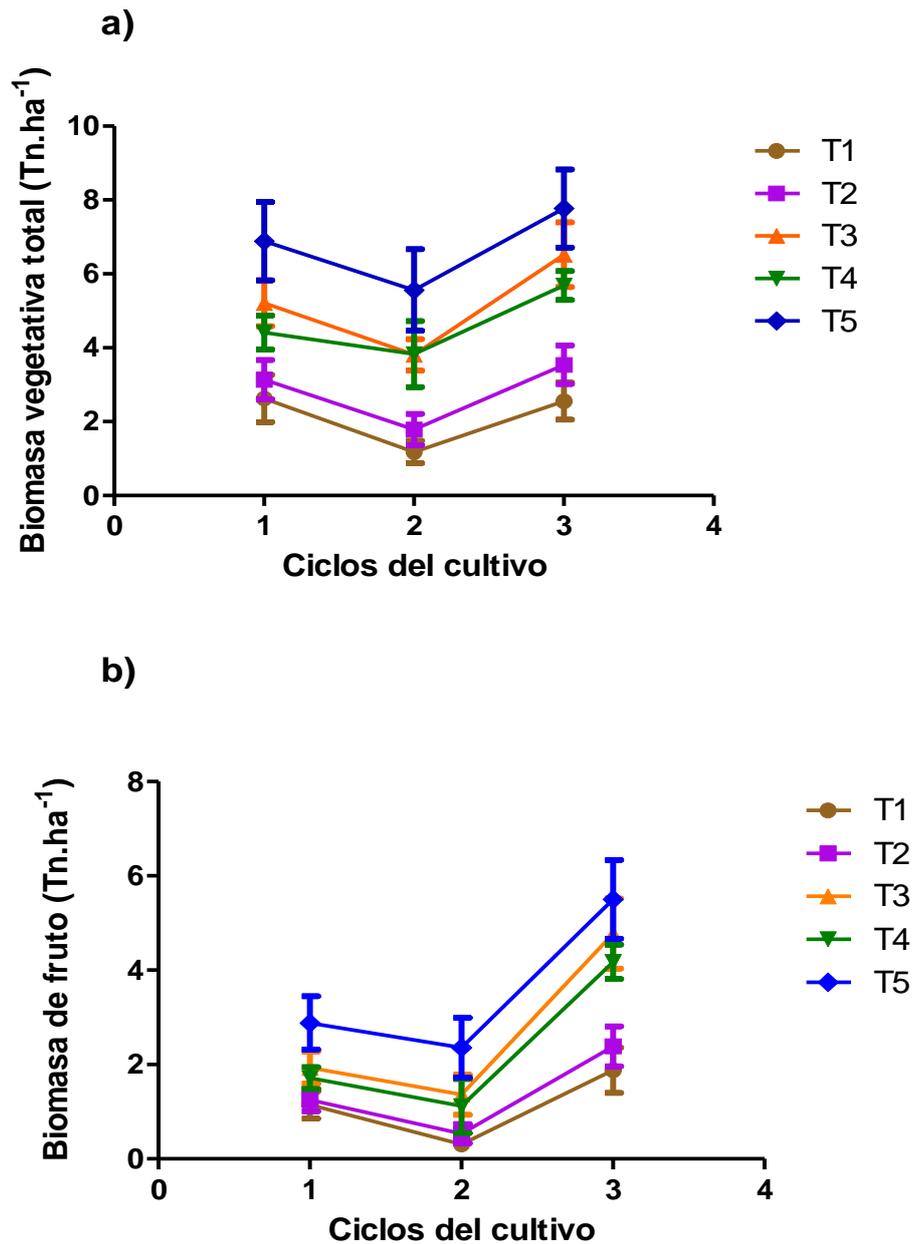


Figura 8. Resumen de los efectos de los cinco tratamientos sobre la producción: a) Biomasa vegetativa total y b) Biomasa del fruto a través de los tres ciclos del cultivo de rábano (*Raphanus sativus* L.).

T1: control, T2: Purín de cerdo, T3: Biochar, T4: Biochar con pH ajustado a neutro y T5: Biochar con pH ajustado a neutro con un ajuste de concentración de N a base de urea granulada.

En síntesis como se observa en la (Figura 8), a través de los tres ciclos del cultivo establece que la mayor producción de biomasa vegetativa se dio en los tratamientos que utilizaron biochar (T3, T4 y T5), acorde a la siguiente tendencia: $T5 > T3 > T4 > T2 > T1$, siendo constante la mayor producción de biomasa vegetativa para el T5 con un promedio de producción: 6.8, 5.6 y 7.7 (Tn/ha), (Tabla 10, 11 y 12).

2. Suministro de nitrógeno en el suelo

Se determinó el suministro del nitrógeno a través de Nitrato (NO_3^-), y Amonio (NH_4^+) en los tres ciclos del cultivo (Anexo 14 y 15).

2.1. Nitrato (NO_3^-)

Se determinó mediante el análisis de varianza (ANOVA) que para un periodo de (42 días) no se registró efectos significativos de los tratamientos sobre el suministro de nitratos en el suelo, para el primer ciclo del cultivo con un valor de ($P < 0.6592$), para el segundo cultivo con un valor de ($P < 0.302$) y para el tercer cultivo con un valor de ($P < 0.517$), (Anexo 18).

Tabla 12. Resultado de las medias del suministro de nitratos (NO_3^-) en el suelo y los subgrupos homogéneos indicados por la misma letra, para los tres ciclos del cultivo.

Tratamiento	Primer ciclo del cultivo	Segundo ciclo del cultivo	Tercer ciclo del cultivo
	($\mu\text{g N}/10 \text{ cm}^2/201$ días)	($\mu\text{g N}/10 \text{ cm}^2/201$ días)	($\mu\text{g N}/10 \text{ cm}^2/201$ días)
T5	414.87 a	255.33 a	224.88 a
T4	558.44 a	313.00 a	274.08 a
T3	465.61 a	167.83 a	193.98 a
T2	534.73 a	292.33 a	212.81 a
T1	550.74 a	308.50 a	146.54 a

T1: control, T2: Purín de cerdo, T3: Biochar, T4: Biochar con pH ajustado a neutro y T5: Biochar con pH ajustado a neutro con un ajuste de concentración de N a base de urea granulada.

2.2. Amonio (NH_4^+)

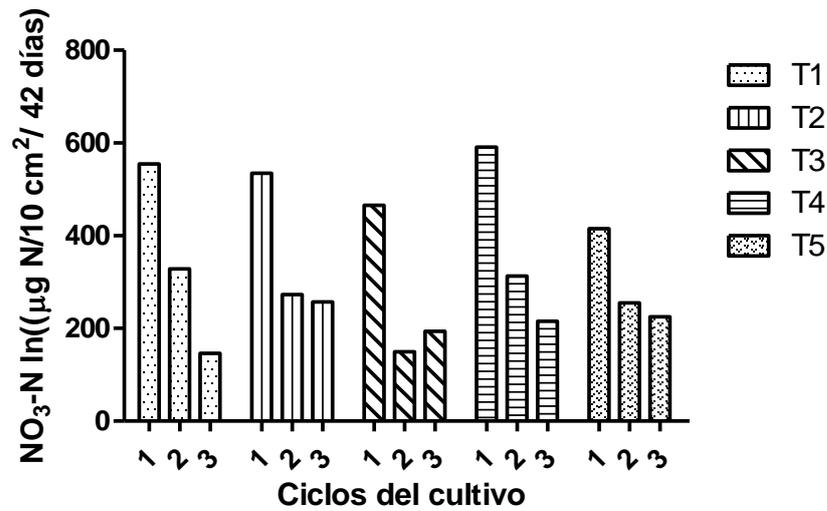
Se determinó mediante el análisis de varianza (ANOVA) que para un periodo de (42 días) no se registró efectos significativos de los tratamientos sobre el suministro de amonio en el suelo, para el primer ciclo del cultivo con un valor de ($P < 0.3648$), para el segundo cultivo con un valor de ($P < 0.3801$) y para el tercer cultivo con un valor de ($P < 0.438$), (Anexo 19).

Tabla 13. Resultado de las medias del suministro de amonio (NH_4^+) en el suelo y los subgrupos homogéneos indicados por la misma letra, para los tres ciclos del cultivo.

Tratamiento	Segundo ciclo del cultivo		
	Primer ciclo del cultivo ($\mu\text{g N}/10 \text{ cm}^2/201 \text{ días}$)	Segundo ciclo del cultivo ($\mu\text{g N}/10 \text{ cm}^2/201 \text{ días}$)	Tercer ciclo del cultivo ($\mu\text{g N}/10 \text{ cm}^2/201 \text{ días}$)
T5	0.58 a	0.750 a	2.76 a
T4	0.5 a	0.8 a	3.06 a
T3	0.66 a	1.23 a	2.81 a
T2	0.25 a	1.10 a	2.51 a
T1	0.45 a	0.7 a	2.55 a

T1: control, T2: Purín de cerdo, T3: Biochar, T4: Biochar con pH ajustado a neutro y T5: Biochar con pH ajustado a neutro con un ajuste de concentración de N a base de urea granulada.

a)



b)

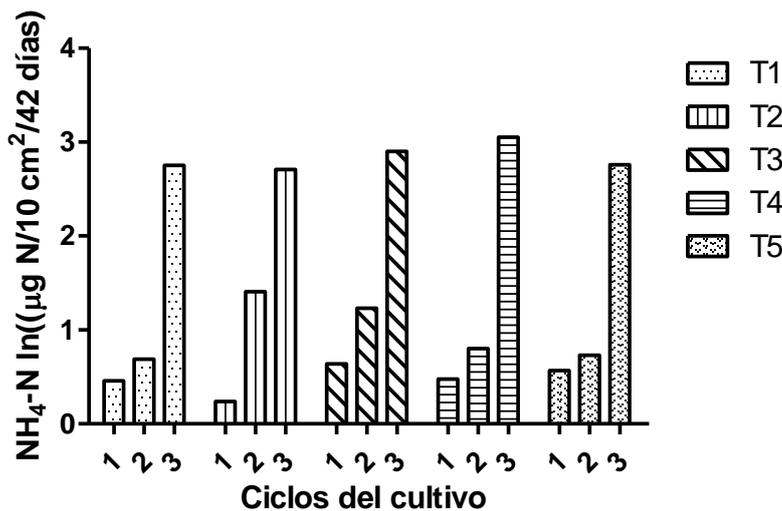


Figura 9. Efectos de los cinco tratamientos sobre la tasa de suministro de: a) nitratos (NO₃⁻) y b) amonio (NH₄⁺) en el suelo en los tres ciclos del cultivo.

T1: control, T2: Purín de cerdo, T3: Biochar, T4: Biochar con pH ajustado a neutro y T5: Biochar con pH ajustado a neutro con un ajuste de concentración de N a base de urea granulada. 1: primer ciclo del cultivo (14 días), 2: segundo ciclo del cultivo (14 días) y 3: tercer ciclo del cultivo (14 días).

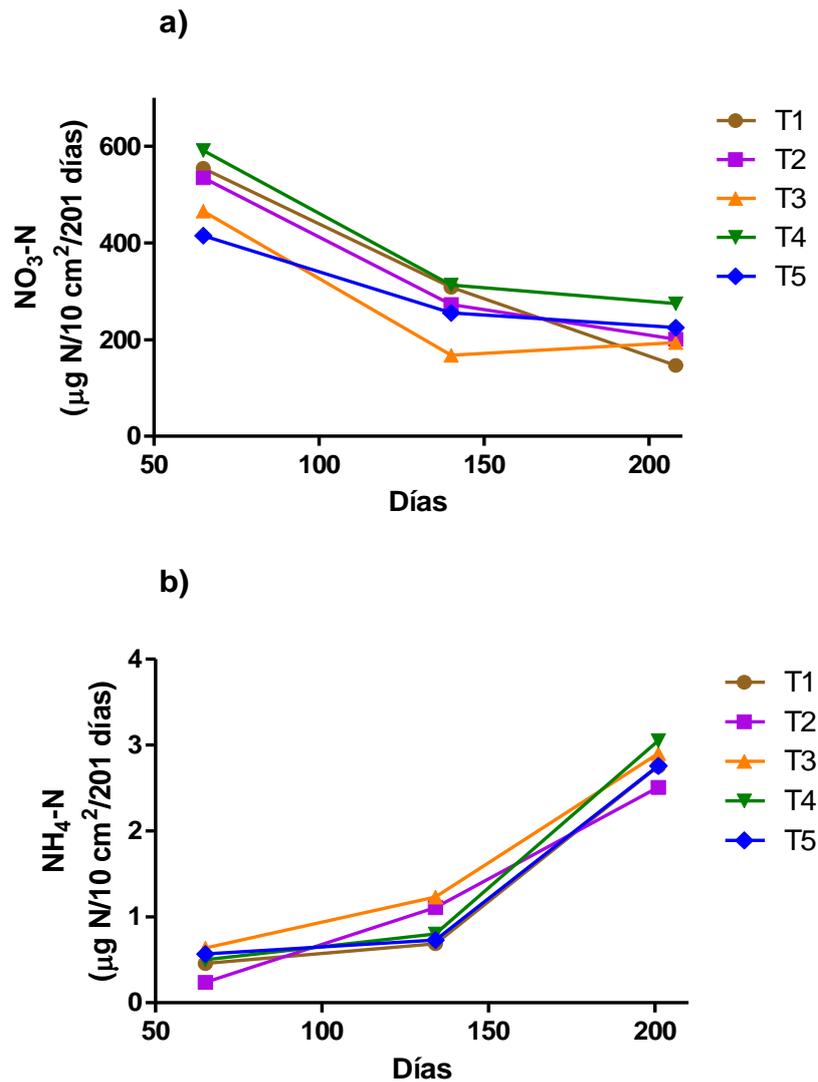


Figura 10. Resumen de los efectos de los cinco tratamientos sobre la tasa de suministro de: a) nitratos (NO₃⁻) y b) amonio (NH₄⁺) en el suelo a través del periodo completo de los tres ciclos del cultivo (208 días).

T1: control, T2: Purín de cerdo, T3: Biochar, T4: Biochar con pH ajustado a neutro y T5: Biochar con pH ajustado a neutro con un ajuste de concentración de N a base de urea granulada.

En síntesis como se observa en la (Figura 10), se establece que el suministro de nitratos (NO_3^-), disminuye a lo largo de los (208 días) que duraron los 3 ciclos del cultivo, sin embargo el suministro de amonio (NH_4^+) sufre un leve incremento a lo largo de este periodo de tiempo.

A pesar de que no existen diferencias significativas entre los tratamientos, se denota que en el suministro de nitrato (Tabla 12), los tratamiento que utilizaron biochar poseen un leve incremento del suministro de nitratos en comparación con los demás tratamientos, así mismo ocurre en el caso del suministro de amonio (Tabla 13), donde se aprecia que a medida que llega al último ciclo del cultivo el suministro de amonio se incrementa levemente en el T4.

3. Suministro de nitrógeno en el suelo

Los parámetros evaluados para determinar la absorción de N del cultivo en los tres ciclos del cultivo fueron: biomasa vegetativa total, biomasa del fruto y biomasa de hojas.

1.1. Primer ciclo del cultivo

Se determinó mediante el análisis de varianza (ANOVA) que durante el primer ciclo del cultivo (65 días), se registraron un efectos significativos de los tratamientos sobre los absorción de N por la biomasa vegetativa total con un valor de ($P < 0.0009$), así mismo la biomasa del seco con un valor ($P < 0.0048$) y biomasa de hojas con un valor ($P < 0.0023$) (Anexo 20).

Así mismo se determinó mediante la prueba de Tukey ($\alpha=0.05$) las diferencias significativas entre los tratamientos para cada parámetro y los subgrupos homogéneos están indicados por la misma letra para el primer ciclo del cultivo (Tabla 14).

Tabla 14. Resultado de las medias y los subgrupos homogéneos indicados por la misma letra, de la absorción de N por biomasa vegetativa total, biomasa del fruto y biomasa de hojas, para el primer ciclo del cultivo.

Tratamiento	Biomasa vegetativa	Biomasa del fruto	Biomasa de hojas
	total (kg.ha ⁻¹)	(kg.ha ⁻¹)	(kg.ha ⁻¹)
T5	341.474 a	88.315 a	253.159 a
T4	251.407 abc	66.869 ab	184.538 ab
T3	276.122 ab	67.385 ab	208.736 ab
T2	156.01 bc	32.549 b	123.461 b
T1	125.326 c	30.853 b	94.473 b

T1: control, T2: Purín de cerdo, T3: Biochar, T4: Biochar con pH ajustado a neutro y T5: Biochar con pH ajustado a neutro con un ajuste de concentración de N a base de urea granulada.

En la (Figura 11) se observa que durante el primer ciclo del cultivo se tiene una tendencia marcada de mayor retención de N en la biomasa del cultivo para los tratamientos que utilizaron biochar (T3, T4 y T5), acorde a la siguiente tendencia: T5>T3>T4>T2>T1; siendo el T5 con un promedio de 341.47 (kg/ha), (Tabla 14), el de mayor retención de N absorbido por parte de la biomasa vegetativa total.

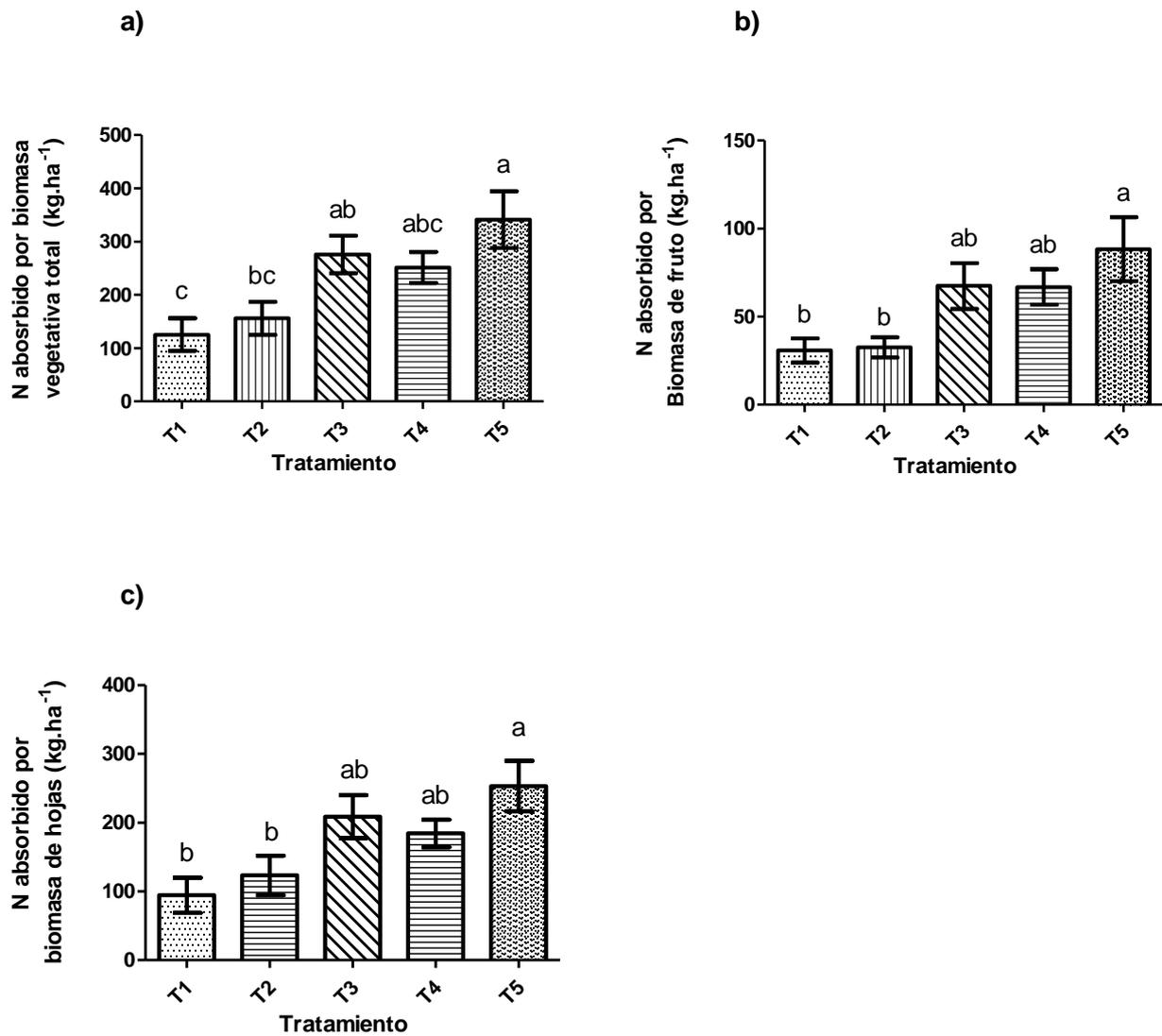


Figura 11. Efecto de los cinco tratamientos sobre la retención de N por: a) Biomasa vegetativa total, b) Biomasa del fruto y c) Biomasa de las hojas, para el primer ciclo del cultivo rábano (*Raphanus sativus* L.).

T1: control, T2: Purín de cerdo, T3: Biochar, T4: Biochar con pH ajustado a neutro y T5: Biochar con pH ajustado a neutro con un ajuste de concentración de N a base de urea granulada

1.2. Segundo ciclo del cultivo

Se determinó mediante el análisis de varianza (ANOVA) que durante el segundo ciclo del cultivo (66 días), se registró un efectos significativo de los tratamientos sobre los absorción de N por la biomasa vegetativa total con un valor de ($P < 0.0004$), así mismo la biomasa del fruto con un valor ($P < 0.0285$) y biomasa de hojas con un valor ($P < 0.0024$) (Anexo 21).

Así mismo se determinó mediante la prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$) las diferencias significativas entre los tratamientos para cada parámetro y los subgrupos homogéneos están indicados por la misma letra para el primer segundo del cultivo (Tabla 15).

Tabla 15. Resultado de las medias y los subgrupos homogéneos indicados por la misma letra, de la absorción de N por biomasa vegetativa total, biomasa del fruto y biomasa de hojas, para el segundo ciclo del cultivo.

Tratamiento	Biomasa vegetativa	Biomasa del fruto	Biomasa de hojas
	total (kg.ha ⁻¹)	(kg.ha ⁻¹)	secas (kg.ha ⁻¹)
T5	257.66 a	74.26 a	183.4 a
T4	184.015 ab	40.46 ab	143.54 ab
T3	183.09 ab	47.41 ab	135.67 ab
T2	91.37 b	16.43 ab	74.94 b
T1	60.52 b	8.94 b	51.58 b

T1: control, T2: Purín de cerdo, T3: Biochar, T4: Biochar con pH ajustado a neutro y T5: Biochar con pH ajustado a neutro con un ajuste de concentración de N a base de urea granulada.

En la (Figura 12) se observa que durante el segundo ciclo del cultivo se tiene una tendencia marcada de mayor retención de N en la biomasa del cultivo para los tratamientos que utilizaron biochar (T3, T4 y T5 acorde a la siguiente tendencia: $T5 > T4 > T3 > T2 > T1$; siendo el T5 con un promedio de 257.66 (kg/ha) (Tabla 15), el de mayor retención de N absorbido por parte de la biomasa vegetativa total.

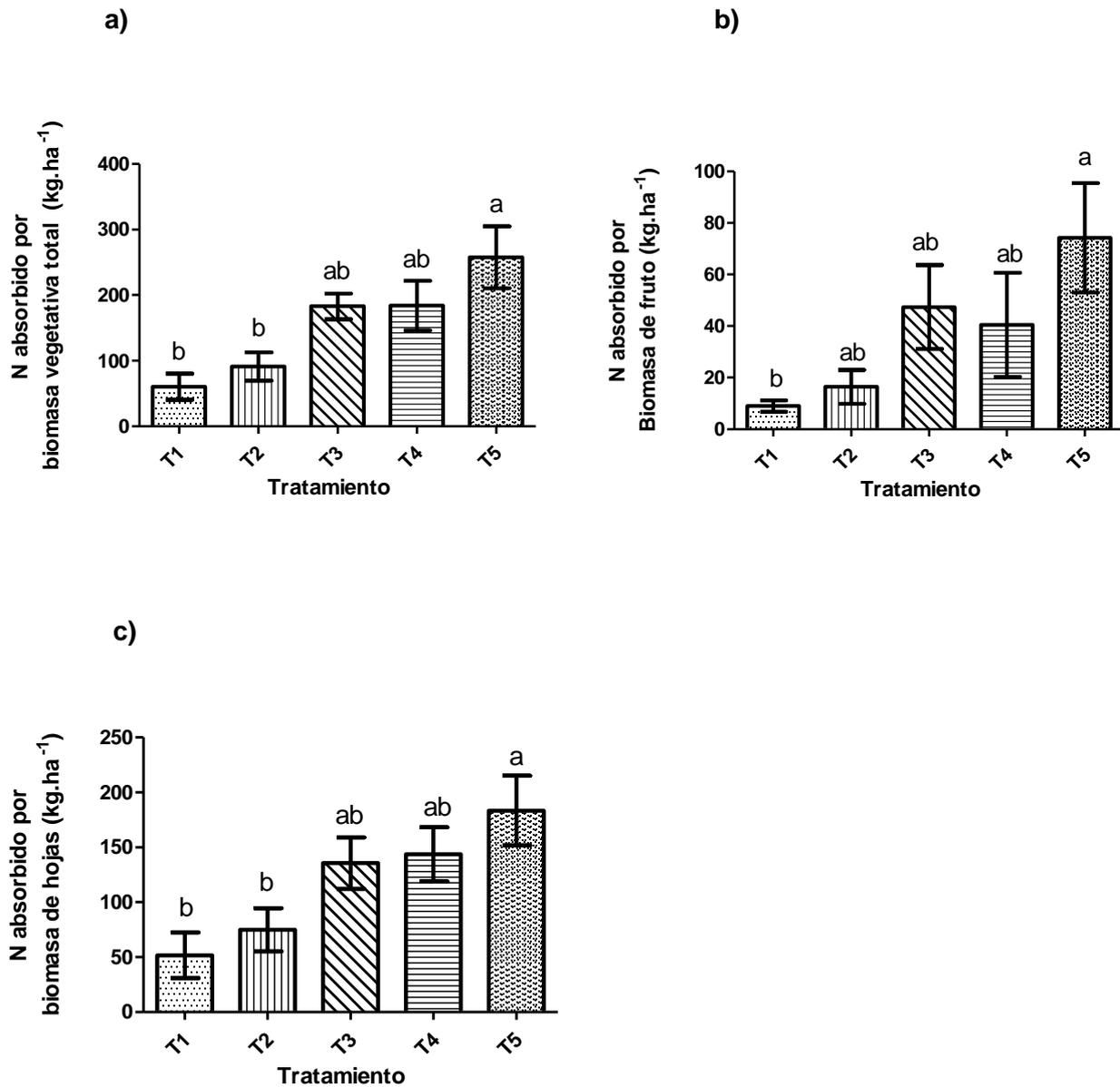


Figura 12. Efecto de los cinco tratamientos sobre la retención de N por: a) Biomasa vegetativa total, b) Biomasa del fruto y c) Biomasa de las hojas, para el segundo ciclo del cultivo rábano (*Raphanus sativus* L.).

T1: control, T2: Purín de cerdo, T3: Biochar, T4: Biochar con pH ajustado a neutro y T5: Biochar con pH ajustado a neutro con un ajuste de concentración de N a base de urea granulada.

1.3. Tercer ciclo del cultivo

Se determinó mediante el análisis de varianza (ANOVA) que durante el tercer ciclo del cultivo (64 días), se registró un efectos significativo de los tratamientos sobre los absorción de N por la biomasa vegetativa total con un valor de ($P < 0.0001$), así mismo la biomasa del fruto con un valor ($P < 0.0001$) y biomasa de hojas con un valor ($P < 0.0036$) (Anexo 22).

Así mismo se determinó mediante la prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$) las diferencias significativas entre los tratamientos para cada parámetro y los subgrupos homogéneos están indicados por la misma letra para el tercer ciclo del cultivo (Tabla 16).

Tabla 16. Resultado de las medias y los subgrupos homogéneos indicados por la misma letra, de la absorción de N por biomasa vegetativa total, biomasa del fruto y biomasa de hojas, para el tercer ciclo del cultivo.

Tratamiento	Biomasa vegetativa	Biomasa del fruto	Biomasa de hojas
	total (kg.ha ⁻¹)	(kg.ha ⁻¹)	secas (kg.ha ⁻¹)
T5	253.5 a	165.65 a	87.85 a
T4	250.36 a	164.52 a	78.35 a
T3	230.79 a	165.24 a	65.54 ab
T2	118.48 b	71.05 b	47.42 ab
T1	80.24 b	54.25 b	25.98 b

T1: control, T2: Purín de cerdo, T3: Biochar, T4: Biochar con pH ajustado a neutro y T5: Biochar con pH ajustado a neutro con un ajuste de concentración de N a base de urea granulada.

En la (Figura 13) se observa que durante el tercer ciclo del cultivo se tiene una tendencia marcada de mayor retención de N en la biomasa del cultivo para los tratamientos que utilizaron biochar (T3, T4 y T5) y esta tendencia fue: $T5 > T4 > T3 > T2 > T1$; siendo el T5 con un promedio de 253.5 (kg/ha), (Tabla 15), el de mayor retención de N absorbido por parte de la biomasa vegetativa total.

4. Suministro de nitrógeno en el suelo

El balance se realizó para los tres ciclos del cultivo del rábano, inicialmente se determinó el Stock inicial en el suelo (Tabla 17).

Tabla 17. Resumen de las entradas de N dentro del sistema planta-tratamiento-suelo.

Tratamiento	Stock inicial de N en el suelo (kg/ha)	Stock inicial de N en el suelo disponible para el cultivo (kg/ha)	Ingreso de N- fertilización (kg/ha)	Ingreso de N- atmosférica (kg/ha)	Ingreso de N- mineralizado (kg/ha)	N- entrada (Kg/ha)
T1	2025.14	40.50	0	78.7	16.04	135.24
T2	2025.14	40.50	100	78.7	16.04	235.24
T3	2025.14	40.50	100	78.7	16.04	235.24
T4	2025.14	40.50	100	78.7	16.04	235.24
T5	2025.14	40.50	100	78.7	16.04	235.24

T1: control, T2: Purín de cerdo, T3: Biochar, T4: Biochar con pH ajustado a neutro y T5: Biochar con pH ajustado a neutro con un ajuste de concentración de N a base de urea granulada.

Posterior a esto se efectuó el balance de nitrógeno (Anexo 13), con los datos de stock final de N en el suelo (Anexo 12), se determinó el N perdido para cada tratamiento a través de los tres ciclos del cultivo, como se observa en la (Tabla 18)

Tabla 18. Resumen del balance del nitrógeno para cada tratamiento a través de las tres ciclos de cultivo.

Tratamiento	N- entrada (Kg/ha (Kg/ha)	N-final en el Suelo (kg/ha)	Salida de	Salida de	Salida de	Pérdida de N (Kg/ha)	Pérdida de N (%)
			N exportado en cosecha 1 (kg/m ²)	N exportado en cosecha 2 (kg/m ²)	N exportado en cosecha 3 (kg/ha)		
T1	135.24	17.18	33.02	8.37	8.19	73.77	54.55
T2	235.24	17.91	41.54	8.30	11.25	162.34	69.01
T3	235.24	15.70	71.96	16.63	23.82	114.27	48.58
T4	235.24	15.98	70.27	16.32	25.64	115.58	49.13
T5	235.24	15.76	83.57	23.48	25.73	88.69	36.56

T1: control, T2: Purín de cerdo, T3: Biochar, T4: Biochar con pH ajustado a neutro y T5: Biochar con pH ajustado a neutro con un ajuste de concentración de N a base de urea granulada.

Se determinó mediante el análisis de varianza (ANOVA) que a través de los tres ciclos del cultivo (208 días), se registró un efecto significativo de los tratamientos sobre la pérdida de N con un valor de ($P < 0.0001$), (Anexo 23). Así mismo se determinó mediante la prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$) las diferencias significativas entre los tratamientos y los subgrupos homogéneos están indicados por la misma letra (Tabla 19).

Tabla 19. Resultado de las medias y subgrupos homogéneos para la pérdida de N del sistema productivo al finalizar los tres ciclos del cultivo.

Tratamiento	Perdida de N
T5	88.6 c
T4	115.5 b
T3	114.5 b
T2	142.3 a
T1	73.7 c

T1: control, T2: Purín de cerdo, T3: Biochar, T4: Biochar con pH ajustado a neutro y T5: Biochar con pH ajustado a neutro con un ajuste de concentración de N a base de urea granulada.

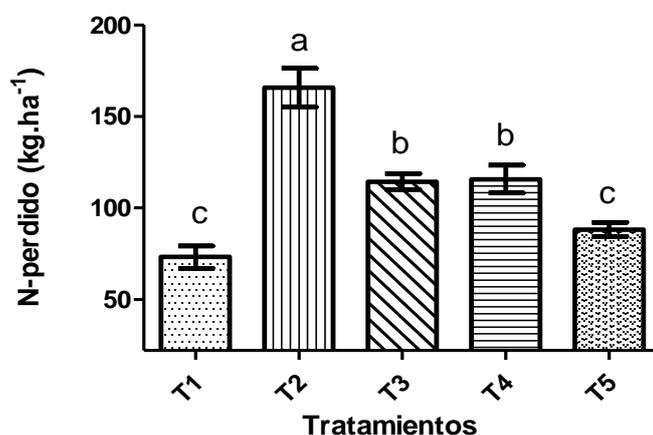


Figura 13. Perdida de N al finalizar los tres ciclos del cultivo, para cada tratamiento aplicado en el sistema planta-tratamiento-suelo.

T1: control, T2: Purín de cerdo, T3: Biochar, T4: Biochar con pH ajustado a neutro y T5: Biochar con pH ajustado a neutro con un ajuste de concentración de N a base de urea granulada.

En síntesis como se observa en la (Figura 15), al finalizar los tres ciclos del cultivo se establece una tendencia marcada de menor pérdida de N en el sistema planta-biochar-suelo para los tratamientos que utilizaron biochar (T3, T4 y T5) y para el control T1, acorde a la siguiente tendencia: $T1 > T5 > T4 > T3 > T2$; para lo cual los promedios de pérdida de N para el T1 y T5 fueron 73.7 y 88.6 (kg/ha), (Tabla 18), así mismo se observa que la diferencia de pérdida de N en (kg/ha) es mínima entre ambos tratamientos, sin embargo cuando se determinan los porcentajes de pérdida en relación al N que ingresa para cada tratamiento, la tendencia cambia a: $T5 > T3 > T4 > T1 > T2$ (Tabla 17), siendo el T5, el tratamiento que menor pérdida de N tiene dentro de su sistema planta-biochar-suelo, con un porcentaje 36.5 % de pérdida.

VI. DISCUSIÓN

1. Producción de biomasa

1.1. *Producción de biomasa*

Los resultados obtenidos del experimento indican que los tratamientos que utilizaron biochar elaborado a base de residuos verdes y purín de cerdo, incluyendo los tratamientos que posteriormente fueron modificados a pH neutro y con una estandarización del contenido de nitrógeno a 100 kg de N/ha (T3, T4 y T5), obtuvieron una mayor producción de biomasa vegetativa total del cultivo y fruto del rábano en los tres ciclos (Tabla 9, Tabla 10 y Tabla 11) (Anexo 5-d y 5- d y 5-e) comparado con los tratamientos T1 y T2 (Anexo 5-a y 5-b); lo cual va acorde a los diversos estudios que demostraron una respuesta positiva del crecimiento de los cultivos, en términos de biomasa vegetativa, cuando se utiliza como enmienda de suelo una mezcla de biochar con fertilizantes nitrogenados como es el caso de la urea (Lehmann *et al.*, 2003; Chan *et al.*, 2007; Steiner *et al.*, 2007), así mismo estos resultados coinciden con los incrementos en la producción de diferentes cultivos obtenidos en otros estudios que utilizaron biochar (Chan *et al.* 2007; Van Zwieten b. *et al.* 2010).

Para lograr una aplicación estandarizada a 100 kg de N/ha en los tratamientos, se tendría que aplicar 15.63 y 14.71 Tn/ha del tratamiento T3, T4 y T5 (Tabla 3), lo que sugiere que a partir de esta tasa de aplicación se obtienen resultados positivos acorde con el estudio donde la aplicación de biochar a cantidades entre 10 y 25 Tn/ha generan resultados efectivos en la producción del cultivo de rábano (Chan *et al.*, 2008), lo cual va en contraste con los resultados obtenidos cuando se utiliza biochar de residuos verdes a

una tasa de aplicación de 100 Tn/ha, lo cual no proporcionó ningún efecto positivo en la producción del cultivo de rábano (Chan *et al.*, 2007).

De igual forma se aprecia que para el segundo ciclo del cultivo (Figura 6), existe una decaída en la producción de biomasa vegetativa total de 1.3 Tn/ha para el T5 comparado con el primer y último ciclo del cultivo, sin embargo la caída de la producción de biomasa se ve reflejado en todos los tratamiento, esto se puede relacionar a la fecha de siembra y cosecha que fueron entre los meses de julio y septiembre (Tabla 5), donde la temperatura promedio llegó a 16.09°C (Anexo 6), la cual es relativamente baja por la temporada de invierno y considerando que la germinación del cultivo de rábano es óptima a temperaturas de 25 °C en promedio (Carrera, 2015), sugiere que las temperaturas propicias de la estación afectaron a todos los cultivos, generando así una baja y lenta producción de biomasa vegetativa total.

Por otro lado esta decaída de la producción de la biomasa vegetativa puede ser apoyado por la falta de adición de insumos fertilizantes para el segundo ciclo del cultivo, por tal motivo la producción de biomasa vegetativa del primer ciclo es superior, sin embargo para el tercer ciclo del cultivo, los tratamientos que utilizaron biochar (T3, T4 y T5) muestran que sus valores se distancian aún más de los demás tratamientos (T1 y T2), (Figura 7); es aquí donde se observa claramente el efecto del biochar, sugiriendo que este permite un uso más eficiente del fertilizante agregado por un tiempo más prolongado, por lo que el requerimiento de fertilización nitrogenada en estos tratamientos y ciclo disminuye (Utomo *et al.*, 2012).

De igual manera la presencia de microorganismos como *Azospirillum* sp. y *Azobacter* sp. se puede a ver incrementado por la presencia de biochar como enmienda en el suelo,

ya que permite expansión de microorganismo capaces de fijar el N en ambientes con limitantes (Thies & Rillig, 2009) , por lo que se infiere que existe una eficiente fijación de dicho nutriente para los tratamientos que utilizan biochar y los de mayor periodo de tiempo, es por ello que se observa que finalmente el tercer ciclo del cultivo es el que posee la mayor producción de biomasa y fruto vegetativo para el T5.

1.2. Área foliar específica (SLA)

Para los tres ciclos del cultivo se determinó el área foliar específica SLA, debido a que es un parámetro que afecta al desarrollo de la plantas del cultivo y por ende a la capacidad fotosintética (Pérez *et al.*, 2004).

Los resultados demuestran que existe diferencias significativas entre tratamientos para la producción de SLA para el tercer ciclo del cultivo (Figura 7), sin embargo en los otros dos ciclos si bien es cierto no existe una diferencia significativa entre tratamientos (Figura 5 y 6), se observa una diferenciación notable entre la producción de SLA de los tratamientos que utilizaron biochar versus el control y T2 (Tabla 10 y 11).

La producción de SLA incrementa conforme a los niveles de aplicación de enmiendas que aportan nitrógeno, teniendo como resultado un incremento en la biomasa aérea de las plantas (Amanullah *et al.*, 2007); lo cual se refleja a los resultados de SLA obtenidos para los tres ciclos del cultivo donde se muestra que existe una tendencia de mayor producción de SLA en los tratamiento que utilizaron biochar T5, T4 y T3 y esto es resultado de la capacidad del biochar de incrementar los valores de SLA debido a la retención de nutrientes en el suelo por un mayor periodo de tiempo (Olmo & Villar,

2015), por consiguiente al llegar al último ciclo del cultivo se observa que posee la mayor producción SLA en los T3, T4 y T5.

2. Efectos sobre el suministro de nitrógeno en el suelo

La técnica de enriquecimiento de biochar utilizada en la presenta investigación pudo influenciar en los resultados, debido a que no se presentaron diferencias significativas entre tratamientos para el suministro de nitrógeno, ya que el proceso utilizado fue mecánico y no un proceso meticuloso (Jassal *et al.*, 2015).

Sin embargo, por la acción de las bacterias nitrificantes, los fertilizantes nitrogenados aplicados como parte del enriquecimiento de biochar terminan transformadas en nitratos NO_3^- (Barrios *et al.*, 2010), por lo cual de manera general se observa que para los tres ciclos del cultivo la tasa de suministro de nitratos fue mayor que la de amonio NH_4^+ .

Por otro lado se observa que el suministro de nitrato NO_3^- a lo largo de los tres ciclos del cultivo tuvo un descenso pronunciado para el T1 (Figura 9), esto se generó debido al constante riego que genera así la lixiviación de nutrientes del suelo, por otro lado la ausencia de aplicación de algún tratamiento que aporte fuentes nitrogenadas al suelo y también por la remoción de N por las plantas (Bloom *et al.*, 2012).

Estos últimos factores también influyeron en los demás tratamientos aunque el T3, T4 y T5 (Figura 9) tuvieron un menor descenso del suministro de nitrato NO_3^- , esto se da

debido a la capacidad de reducir la lixiviación de nitratos del biochar en el suelo (Yao *et al.*, 2012).

Así mismo se observa que el biochar genera un efecto sobre la disponibilidad de NO_3^- en el suelo debido al estable descenso en el tratamiento T3, T4 y T5 (Tabla 12). Por consiguiente se da la retención de NO_3^- en los poros del biochar como mecanismo de inmovilización del nitrógeno en el suelo (Glaser *et al.*, 2002), por lo tanto la presencia del NO_3^- en el suelo se da por un mayor tiempo y así incrementa la posibilidad de remoción de N por las plantas (Clough *et al.*, 2013).

3. Efectos sobre la absorción de N

Los resultados obtenidos en el experimento indican que la predominancia en la absorción de N por la biomasa vegetativa total se da para el T5 (Tabla 14, 15 y 16), considerando que las plantas pueden absorber el N en sus formas: NO_3^- o NH_4^+ . Por lo general en los suelos las condiciones permiten la acción bacteriana nitrificante y por lo general las plantas absorben el N como NO_3^- (Perdomo & Barbazán, 2010). Como resultado de la mayor disponibilidad de nitrógeno en su forma NO_3^- en el suelo (Figura 14), el biochar permite una mayor captura por parte de las plantas (Saarnio *et al.*, 2013).

La absorción de N también se ve favorecida gracias a la utilización de ácido fosfórico en la modificación del biochar, debido a que incrementa la porosidad y el área de superficie (Liou, 2010) lo cual influye en la capacidad de retención de nutrientes en el suelo, debido a la capacidad de intercambio catiónico y aniónico dada en la superficie del biochar la

cual es beneficiada por la presencia de grupos carboxílicos y otros grupos funcionales (Cheng *et al.*, 2006).

Por otro lado cabe resaltar que la temperatura afecta la captación de NO_3^- , disminuyendo cuando las temperaturas descienden lo cual se ve reflejado en la (Figura 12), para el segundo ciclo del cultivo donde las temperaturas bajaron en promedio a un mínimo $14.2\text{ }^\circ\text{C}$ (Senamhi, 2016), que posteriormente para el tercer ciclo del cultivo volvió a recuperar su producción producto del cambio de estación.

De igual forma la remoción del nitrógeno del suelo es promovida gracias a las fuentes de fósforo y azufre presentes en las enmiendas de biochar permitiendo así la reducción de NO_3^- en el suelo (Camps-Arbestain *et al.*, 2015).

A medida que las enmiendas de biochar llevan mayor tiempo en el suelo, permite el incremento de su CIC, permitiendo conservar la fertilidad del suelo (Cheng *et al.*, 2006), por ende ayuda a mantener la absorción de N constante sin picos de caídas por parte de los cultivos a medida que pasan los ciclos del cultivo (Figura 14).

4. Balance de N

Debido a la metodología aplicada en la presente investigación, se engloba la pérdida del N bajo las siguientes formas:

Mediante la lixiviación, se generan pérdidas de nitratos NO_3^- en el suelo debido a que por su carga negativa no tiene la facilidad de adherirse a los coloides presentes en el suelo, generándose su pérdida por el agua de drenaje que finalmente aleja al nutriente de la rizosferas de la plantas (Philippot y Germon, 2005).

Mediante la volatilización se genera el amoníaco NH_3 que se produce en el suelo de manera natural debido a la degradación de materia vegetal y del suministro de abonos orgánicos o fertilizante químicos, manteniendo esto últimos compuestos un equilibrio con el contenido de amonio NH_4^+ (Brady y Weil, 2004), sin embargo cuando se producen cambios del pH y temperatura del suelo, se incrementa la producción de NH_3 (McNeill y Unkovich, 2007).

En el balance de N que se realizó para el sistema planta-tratamiento-suelo (Tabla 18), se determinó que existe diferencias significativas entre tratamiento (Tabla 19) estableciendo una tendencia marcada de menor pérdida de N para los tratamientos que utilizaron biochar (T3, T4 y T5) y para el control T1, acorde a la siguiente tendencia: $T1 > T5 > T4 > T3 > T2$, sin embargo cuando se determinan los porcentajes de pérdida en relación al N que ingresa para cada tratamiento, la tendencia cambia a: $T5 > T3 > T4 > T1 > T2$ (Figura 15), siendo el T5, el tratamiento que menor pérdida de N tiene dentro del sistema, con un porcentaje 36.5 % de pérdida, esto es completamente reforzado por las investigaciones que demuestran que la porosidad y el área de superficie de un biochar

influyen en la capacidad de retención de nutrientes en el suelo, (Cheng *et al.*, 2006) y en la capacidad de retención de agua (Downie *et al.*, 2009). Esto permite reducir la pérdida de nutrientes por lixiviación (Widowati *et al.*, 2014), como nitrógeno en forma de amonio y nitrato (Yao *et al.*, 2012).

Finalmente la aplicación de biochar como enmienda de suelo reduce la disponibilidad de nitrato NO_3^- en el sistema, teniendo como efecto una reducción de N desnitrificado (Sánchez-García *et al.*, 2014) y como consecuencia la reducción de N_2O a N_2 (Cayuela *et al.*, 2013).

5. Impacto económico

La producción de biochar como enmienda de suelo en la agricultura convencional, representa una alternativa económica debido a que requiere insumos como biomásas que usualmente no son aprovechadas, lo cual es un beneficio económico para los pequeños y medianos agricultores (Guerra, 2015), frente a lo que sería una fertilización de suelos mediante el uso de químicos.

Así mismo ayuda a disminuir las cantidades de uso de fertilizantes nitrogenados, como es el caso de la urea granula debido a que para lograr una aplicación de 100 kg de N/ha, solo se requieren 24 kg de urea (Anexo 25) en la preparación del biochar en el T5, por ende nos disminuye costos en la fertilización de cultivos, de la misma forma al aplicar biochar mejorado no se requiere realizar fertilización para cada ciclo del cultivo, debido a que su porosidad influyen en la capacidad de retención de nutrientes en el suelo,

liberando así los nutrientes de manera periódica (Cheng *et al.*, 2006), lo cual representa un ahorro en mano de obra para la fertilización de los suelos.

VII. CONCLUSIONES

- La aplicación de biochar modificado permite el aprovechamiento del N aportado por la urea granulada, generando así un mayor incremento de la producción de biomasa del cultivo de rábano, comparado con la producción de biomasa que se dio al utilizar un purín de cerdo como fertilizar, el cual es comúnmente usado en la agricultura convencional.
- La aplicación de biochar como fertilizante en la agricultura posee un potencial relevante para el ambiente debido a que ayuda a disminuir la pérdida de nitrógeno del sistema planta-biochar-suelo.
- El biochar permite aprovechar el uso de la urea granulada en los cultivos de rábano de forma eficiente, gracias a la retención de nutrientes y mayor absorción del nitrógeno por parte de la biomasa vegetativa del cultivo, disminuyendo la pérdida de nutrientes fuera del sistema planta-biochar-suelo.
- La aplicación de biochar de forma individual o mejorada con urea granulada permite disminuir los requerimientos de nitrógeno de cultivos posteriores hasta tres cosechas.
- La utilización de biochar en la agricultura convencional es una alternativa económica, debido a que ayuda a disminuir las cantidades de uso de fertilizantes nitrogenados.

VIII. RECOMENDACIONES

Se determinó las siguientes recomendaciones para futuras investigaciones relacionadas al biochar como enmienda del suelo:

- Experimentar con otras técnicas de modificación previa del biochar de bajo coste y fácil empleo, como el compostar el biochar con diferentes fuentes de nitrógeno.
- Realizar estudios de mayor plazo para evaluar la duración de los efectos benéficos del biochar sobre la disponibilidad del nitrógeno y su efecto sobre la pérdida de N en el suelo en el tiempo.
- Evaluar otros rasgos funcionales del cultivo.
- Experimentar con otros cultivos de relevancia nutricional y económica a nivel nacional.
- Experimentar con cultivos de mayor ciclo de vida en el suelo.
- Realizar estudios con sondas simuladoras de raíces en suelos enmendados con biochar para monitorear los requerimientos de distintos cultivos antes y durante su crecimiento bajo diferentes condiciones ambientales.
- Experimentar con biochar obtenidos de diferentes materias primas como los residuos domésticos municipales como empuje del biochar como parte del manejo integral de residuos verdes de la ciudad.
- Comparar la producción de biomasa y pérdida de nitrógeno del biochar con un tratamiento que solo aplica urea granulada
- Evaluar un control sin cultivo para determinar el destino o comportamiento del N con el suelo y su microbiota.

IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Álvarez, R. (2006). Balance de nitrógeno en cultivos de trigo. *INTA-Estación Experimental Agropecuaria Rafaela. Información Técnica de Trigo, Campaña, 105.*
2. Améndola-Massiotti, R., Cach-Gómez, I., Álvarez-Sánchez, E., López-Cruz, I., Burgueño-Ferreira, J., Martínez-Hernández, P., & Cristóbal-Acevedo, D. (2011). Balance de nitrógeno en maíz forrajero con diferente fertilización y fase de rotación con praderas. *Agrociencia, 45(2)*, 177-193. Recuperado de:
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952011000200004
3. Antal, M. J., & Grønli, M. (2003). El arte, la ciencia y la tecnología de la producción de carbón. *Investigación Química Industrial y de Ingeniería, 42(8)*, 1619-1640.
4. A.O.A.C. Official Methods of Analysis 13 th Edition, 1984
5. Aquaquimi. (2015) Ficha técnica de Ácido Fosfórico. Recuperado de:
<http://www.aquaquimi.com/PDF/hoja%20tecnica/ACIDO%20FOSFORICO%2085%20ficha%20tecnica.pdf>
6. Arjona, H. (2003). Estimación del área foliar de cebolla de bulbo (*Allium cepa* L. Yellow Granex F1) mediante la aplicación de tres modelos estadísticos. *Revista Comalfi 30(1):28-36.*
7. Baloch P., R. Uddin, F. Nizamani, A. Solangi, A. Siddiqui. (2014). Efecto de los fertilizantes de nitrógeno, fósforo y potasio en las características de crecimiento y rendimiento del rábano (*Raphinus sativus* L.). *Agric.&Environ.Sci. 14(6)*, 565-569.

8. Barrios, M., Killorn, R., García, J. (2010). "Nitrificación del amonio a partir de un fertilizante de liberación controlada y úrea convencional en dos suelos de Iowa, EEUU". *Bioagro*, 22(3): 193-200
9. Beadle CL. (1998) Análisis del crecimiento vegetal. In: Coombs J, Hall DO, Long SP, Scurlock JMO editors. Técnicas en fotosíntesis y bioproductividad. Traducción al español de la 2ª edición en inglés. México: Editorial Futura, S. A.
10. Bernhard, A. (2010). "El ciclo del nitrógeno: procesos, jugadores e impacto humano". *Conocimiento de la educación de la naturaleza*, 3(10): 25.
11. Bernhard, A. (2012). El ciclo del nitrógeno: procesos, actores e impacto humano. *Conocimiento de la educación de la naturaleza*, 3(10), 25.
12. Bloom, A.J., Randall, L., Taylor, A.R., Silk, W.K. "Deposición de amonio y nitrato en las raíces de las plántulas de maíz abastecidas con diferentes sales de nitrógeno". *Diario de botánica experimental*. 2012: 63(5):1997-2006.
13. Bridgwater, A. V. (2003). Combustibles renovables y productos químicos por procesamiento térmico de biomasa. *Revista de Ingeniería Química*, 91(2), 87-102.4. Recuperado de:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894702001420>
14. Brady, N. and Weil R. (2004). Elementos de la naturaleza y propiedades de los suelos. Segunda edición. New jersey: Pearson-Prentice Hall. 606 p.
15. Bremner J. (1965). Métodos de análisis de suelos, Part 2. *Agronomy* 9:1324-1345. Am. Soc. of Agron Madison, Wis.
16. Brownsort, P. A. (2009). Procesos de pirólisis de biomasa: parámetros de rendimiento y su influencia en los beneficios del sistema de biochar.

17. Bultynck L, Fiorani F, Lambers H. (1999). Control del crecimiento de las hojas y su papel en la determinación de la variación en la tasa de crecimiento de las plantas desde una perspectiva ecológica. *Plant Biol* (1):13-18.
18. Camargo, J. A., & Alonso, A. (2007). Contaminación por nitrógeno inorgánico en los ecosistemas acuáticos: problemas medioambientales, criterios de calidad del agua, e implicaciones del cambio climático. *Revista Ecosistemas*, 16(2).
19. Campostrini, E. y Yamanishi, O. (2001). Estimación del área de la hoja de papaya usando la longitud de la costilla central. *Ciencia Agrícola* 58(1):39-42.
20. Camps-Arbestain, M., Amonette, J.E., Singh, B., Wang, T., Schmidt, H.P. (2015). "El sistema de clasificación de biochar y los métodos de prueba asociados". En: J. Lehmann, S. Joseph (Eds.), *Biochar para la gestión ambiental: ciencia, tecnología e implementación* (pp. 165-194). New York, USA: Routledge.
21. Cárdenas-Navarro, R., Sánchez-Yáñez, J. M., Farías-Rodríguez, R., & Peña-Cabriales, J. J. (2004). Los aportes del nitrógeno en la agricultura. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 10(2), 173-178.
22. Carrera Bastidas, J. V. (2015). Respuesta agronómica del cultivo de rábano (*Raphanus sativus*) a la aplicación de abonos orgánicos (Bachelor's thesis, LA MANÁ/UTC/2015).
23. Carter, S., Shackley, S., Ul, S., Suy, T., Haefele, S. (2013). "El impacto de la aplicación de biochar en las propiedades del suelo y el crecimiento vegetal de la lechuga cultivada en maceta (*Lactuca sativa*) y Repollo (*Brassica chinensis*)". *Agronomía*, 3(2): 404.
24. Cayuela, M. L., Sánchez-Monedero, M. A., Roig, A., Hanley, K., Enders, A., & Lehmann, J. (2013). Biochar y desnitrificación en suelos: ¿cuándo, cuánto y por

- qué el biochar reduce las emisiones de N₂O? *Informes científicos*, 3. Recuperado de <http://www.nature.com/articles/srep01732>
25. CCA. (2014). La quema de residuos agrícolas: fuente de dioxinas, Comisión para la Cooperación Ambiental, Montreal, Canadá, 6 pp.
26. Cerón Rincón, L. E., & Ancízar Aristizábal Gutiérrez, F. (2012). Dinámica de los ciclos de nitrógeno y fósforo en suelos. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 14(1), 285-295.
27. Chan, K. Y., Van Zwieten, L., Meszaros, I., Downie, A., & Joseph, S. (2007). Valores agronómicos del biochar de residuos verdes como enmienda del suelo. *Investigación de suelos*, 45(8), 629-634. Recuperado de <http://www.publish.csiro.au/sr/SR07109>
28. Chan, K. Y., Van Zwieten, L., Meszaros, I., Downie, A., & Joseph, S. (2008). Uso de biochar de basura de aves de corral a medida que cambia el suelo. *Investigación de suelos*, 46(5), 437-444. Recuperado de: <http://www.publish.csiro.au/sr/sr08036>
29. Chan, K.Y., Xu, Z. (2009). "Biochar: Propiedades nutritivas y su mejora ". En: J. Lehmann, S. Joseph (Eds.), *Biochar para la Gestión Ambiental: Ciencia, Tecnología e Implementación* (pp. 67-84). London, UK: Earthscan.
30. Cheng, C.-H., Lehmann, J. (2009). "Envejecimiento de carbono negro a lo largo de un gradiente de temperatura". *Quimiosfera*, 75(8): 1021-1027.
31. Cheng, C.-H., Lehmann, J., Thies, J.E., Burton, S.D., Engelhard, M.H. (2006). "Oxidación de carbono negro por procesos bióticos y abióticos". *Geoquímica orgánica*, 37(11): 1477-1488.

32. Chesworth, W. (2008). "Enciclopedia de la ciencia del suelo ". Dordrecht, Países Bajos.
33. Chunxue, Y. A., Joseph, S., Lianqing, L. I., Genxing, P. A., Yun, L. I., Munroe, P., Pace B., Taherymoosavi S., Zwieten L. V., Thomas T., , Donne S. & Nielsen, S. (2015). Desarrollando Fertilizantes Biochar Mejorados Más Efectivos para Mejorar el Rendimiento y la Calidad de la Pimienta. *Pedofera*, 25(5), 703-712
34. Clough, T.J., Condrón, L.M., Kammann, C., Müller, C. (2013). "Una revisión de biochar y dinámica del nitrógeno del suelo". *Agronomía*, 3(2), 275-293.
35. Comisión Europea. (2012). Una agricultura sostenible para el futuro que queremos. Recuperado de http://ec.europa.eu/agriculture/events/2012/rio-side-event/brochure_es.pdf
36. Cornelissen, G., Pandit, N. R., Taylor, P., Pandit, B. H., Sparrevik, M., & Schmidt, H. P. (2016). Emisiones y calidad del carbón de los hornos "Kon Tiki" de cortina de llama para la producción de carbón vegetal / biochar a gran escala. *PloS one*, 11(5), e0154617.
37. Costa, M. (1999). Efectos de diferentes profundidades de agua con dos niveles de salinidad en el cultivo de melón. Tesis Ph. D., Universidad Estatal de Sao Paulo, Botucatu, 115p.
38. CODISEC (2016) Comité Distrital de Seguridad Ciudadana de Lurín. Recuperado de: http://www.seguridadidl.org.pe/sites/default/files/archivos/planes_locales/1plalocal_lurin_opt.pdf

39. Criollo, H.; Garcia, J. Efecto de la densidad de siembra sobre el crecimiento de plantas de rábano (*Raphanus sativus* L.) bajo invernadero. *Revista colombiana de ciencias hortícolas*. 2009. Vol. 3; No.2: 210-222.
40. Davidson A., (2009). La contribución del abono y el fertilizante nitrogenado al óxido nitroso atmosférico desde 1860. *Nat Geosci* 2:659–662
41. Day, D., Evans, R. J., Lee, J. W., & Reicosky, D. (2004). Coproducto de carbono valioso y estable del lavado de gases de escape de combustibles fósiles. *Prepr Pap Am Chem Soc Div Fuel Chem*, 49(1), 352.
42. Downie, A., Crosky, A., Munroe, P. (2009). "Propiedades Físicas de Biochar". En: J. Lehmann, S. Joseph (Eds.), *Biochar para la gestión ambiental: ciencia, tecnología e implementación* (pp. 13-32). Londres, UK: Earthscan
43. Enciclopedia Británica. (s.f.). "Rabano". Recuperado de: <https://www.britannica.com/plant/radish>
44. Enríquez Quiroz, J. F., García Moya, E., Hernández Garay, A., Pérez Amaro, J. A., Pérez, J., & Quero Carrillo, A. R. (2004). Análisis de crecimiento, área foliar específica y concentración de nitrógeno en hojas de pasto. *Técnica Pecuaria en México*.
45. Agencia de Protección ambiental (EPA). (2009). Definiciones de residuos: EPA 842/09.
46. Fabbri, D., Rombolà, A.G., Torri, C., Spokas, K.A. (2013). " Determinación de hidrocarburos aromáticos policíclicos en biochar y suelo modificado biochar ". *Revista de pirólisis analítica y aplicada*, 103(0): 60-67.
47. EBC (2012). Certificado europeo de biochar — Pautas para una producción sostenible de biochar. Fundación Eur Biochar.

48. Errebhi, M., Rosen, C. J., Gupta, S. C., & Birong, D. E. (1998). Respuesta al rendimiento de la papa y lixiviación de nitrato según la influencia del manejo del nitrógeno. *Diario de agronomía*, 90(1), 10-15.
49. Eroski, Santiago. 2011. infoagro. [En línea] febrero de 2011. [Citado el: 17 de diciembre de 2014.] <http://www.consumer.es/aviso-legal/>. 0132.
50. Fenn, M. E., Poth, M.A. (2001). "Un estudio de caso de saturación de nitrógeno en los bosques occidentales de los Estados Unidos". *Diario mundial de Ciencia*. 1: 433-439
51. Fernández, C., Soria, A., (2011). Contaminación de las aguas por nitratos procedentes de fuentes de origen agrario.
52. Fewtrell, L. (2004). Nitrato de agua potable, metahemoglobinemia y carga global de enfermedad: una discusión. *Perspectivas de salud ambiental*, 1371-1374. Recuperado de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1247562/>
53. Galloway, J. N., Townsend, A. R., Erisman, J. W, Bekunda, M., Cai, Z., Freney, J.R., Martinelli L., Seitzinger S. & Sutton, M. (2008). Transformación del ciclo del nitrógeno: tendencias recientes, preguntas y posibles soluciones. *Ciencias*, 320(5878), 889-892.
54. Gentile, R., Vanlauwe, B., Van Kessel, C., & Six, J. (2009). Gestionar la disponibilidad y las pérdidas de N combinando fertilizante-N con diferentes residuos de calidad en Kenia. *Agricultura, ecosistemas y medio ambiente*, 131(3), 308-314. Recuperado de: http://www.plantsciences.ucdavis.edu/vankessel/publications/gentile_et_al.pdf
55. Gedesma. (2007) gestión y desarrollo del medio ambiente. [En línea] 30 de octubre de 2007. Recuperado de: <http://www.gedesma.es/.7>

56. Genesio, L., Miglietta, F., Lugato, E., Baronti, S., Pieri, M., & Vaccari, F. P. (2012). Albedo de superficie después de la aplicación de biochar en trigo duro. *Cartas de investigación ambiental*, 7(1), 014025.
57. Giletto, C. M., & Echeverría, H. E. (2013). Balance de nitrógeno para cultivos de papa en la región pampeana del sudeste, Argentina. *Ciclos de nutrientes en agroecosistemas*, 95(1), 73-86.
58. Glaser, B., Haumaier, L., Guggenberger, G., & Zech, W. (2001). El fenómeno 'Terra Preta': un modelo para la agricultura sostenible en los trópicos húmedos. *Naturwissenschaften*, 88(1), 37-41. Recuperado de: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11302125>
59. González, V., & Pomares, F. (2008). La fertilización y el balance de nutrientes en sistemas agroecológicos. Sociedad Española de Agricultura Ecológica, Madrid. Recuperado de: <https://www.agroecologia.net/recursos/documentos/manuales/manual-fertilizacion-fpomares.pdf>
60. Graetz, H., 1997. Suelos y Fertilización. Traducido por: F. Luna Orozco. Trillas. México. 80 p.
61. Guerra Laura, P. A. (2015). Producción y caracterización de Biochar a partir de la biomasa residual de sistemas agroforestales y de agricultura convencional en la Amazonia peruana. (Tesis inédita de pregrado) Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.
62. Guerrero, N. R., Quintero, M. A. O., & Naranjo, J. C. P. (2012). Determinación del área foliar en fotografías tomadas con una cámara web, un teléfono celular o una

- cámara semiprofesional. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 65(1), 6399-6405.
63. Güereña, D., Lehmann, J., Hanley, K., Enders, A., Hyland, C., & Riha, S. (2013). Dinámica de nitrógeno después de la aplicación en campo de biochar en un sistema templado de producción basado en maíz de América del Norte. *Planta y suelo*, 365(1-2), 239-254.
64. Houghton, T.; Ding, D.; Griggs, M.; Noguer, P.; Van Der Linden, J. y Xiaosu, D. (2001). *Cambio Climático 2001: El fundamento científico*. Rey Unido: IPCC.
65. Hunt R. (1990). *Análisis de crecimiento básico: análisis de crecimiento de plantas para principiantes*. Londres Inglaterra: Unwin Hyman. International Fertilizer Industry Association. (2013) "Mayo 2013". *Indicadores de fertilizantes*, IFA, Paris, Francia.
66. INEI (2012). IV Censo Nacional Agropecuario. Recuperado de: <http://censos.inei.gob.pe/cenagro/tabulados/>
67. INEI (2014). *Compendio Estadístico Perú 2014: Capítulo 12: Agrario: 941-1021*.
68. Infoagro. 2014. cultivo de rábano. Recuperado de <http://www.infoagro.com/hortalizas/rabano.htm>.
69. Iniciativa internacional de biochar (IBI). (2014) *Guía básica para ensayos de biochar en el suelo*.
70. IBI. Definición estandarizada de producto y pautas de prueba de producto para biochar que se usa en el suelo (es decir, estándares de biochar IBI). Recuperado de: <http://www.biochar-international.org/characterizationstandard>.
71. IPCC (2014) *Cambio climático 2014: impactos, adaptación y vulnerabilidad*. En: campo CB, Barros VR, Dokken DJ, Mach KJ, Mastrandrea MD, Bilir TE, Chatterjee

- M, Ebi KL, Estrada YO, Genova RC, et al. (eds.). Resumen para responsables políticos. Contribución del Grupo de Trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático. Universidad de Cambridge, UK. pp. 1–32
72. IPCC. (2001). Cambio Climático 2001: Las bases científicas, Resumen técnico del Grupo de trabajo I del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático, Cambridge, Reino Unido, y Universidad de Cambridge.
73. IPCC (2006). Pautas para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero: Capítulo 11: Emisiones de N₂O de suelos gestionados y emisiones de CO₂ de la aplicación de cal y urea.
74. Ippolito, J. A., Lentz, R. D., Novak, J., Spokas, K. A., Collins, H. P., & Streubel, J. (2011). Uso de biochar: pros y contras. En las Actas de la Conferencia de Manejo de Nutrientes Occidentales, 3-4 de marzo de 2011, Reno, Nevada (Vol. 9, pp. 93-98). Recuperado de <http://eprints.nwisrl.ars.usda.gov/1522/>
75. Ippolito, J.A., Spokas, K.A., Novak, J.M., Lentz, R.D., Cantrell, K.B. (2015). “Composición elemental de biochar y factores que influyen en la retención de nutrientes.”. En: J. Lehmann, S. Joseph (Eds.), *Biochar para la gestión ambiental: ciencia, tecnología e implementación* (pp. 139-163). New York, USA: Routledge.
76. Jeffery S, Bezemer M, Cornelissen G, Kuyper W, Lehmann J, Mommer L, Sohi P, Voorde F, Wardle A, Groenigen W (2015) El camino a seguir en la investigación de biochar: enfocando las compensaciones entre los posibles triunfos. *GCB Bioenergía*.7:1–13
77. Jilani M., T. Burki, K. Waseem. (2010). Efecto del nitrógeno sobre el crecimiento y el rendimiento de rábano. *J Agric Res*. 48(2).

78. Joseph, S. D., Camps-Arbestain, M., Lin, Y., Munroe, P., Chia, C., Hook, J. & Lehmann, J. (2010). Una investigación sobre las reacciones del biochar en el suelo. *Investigación en suelos*. 48(7), 501-515. Recuperado de <http://www.publish.csiro.au/sr/sr10009>
79. Kammann, C. I., Schmidt, H.-P., Messerschmidt, N., Linsel, S., Steffens, D., Müller, C., Koyro, H.-W., Conte, P., Joseph, S. (2015). “Mejora del crecimiento de las plantas mediada por la captura de nitrato en biochar compostado”. *Reportes científicos*, 5, 11080.
80. Khan, M.N., Mohammad, F. (2014). “Eutrofización: desafíos y soluciones”. *Eutrofización: causas, consecuencias y control* (pp. 1-15). Dordrecht, the Netherlands: Springer Netherlands.
81. Koo W, (2016, 6 de enero). “Urea Perú Importación Diciembre 2015”. *Agrodata Perú*. Recuperado de: <http://www.agrodataperu.com/2016/01/urea-peru-importacion-diciembre-2015.html/00urea2-20>
82. Kristoferson, L. A., Bokalders, V. (2013). “Tecnologías de energías renovables: sus aplicaciones en países en desarrollo.”. Elsevier.
83. Klug, M. (2012). Pirólisis, un proceso para derretir la biomasa. *Revista de Química PUCP*, 26, 1-2. Recuperado de: <http://revistas.pucp.edu.pe/index.php/quimica/article/view/5547/5543>
84. Knops, J.M., Reinhart, K. (2000). “Área foliar específica a lo largo de un gradiente de fertilización nitrogenada ”. *El naturalista estadounidense del medio*, 144(2): 265–272.

85. Knowles, O.A., Robinson, B.H., Contangelo, A., Clucas, L. (2011). "Biochar para la mitigación de la lixiviación de nitrato del suelo cambiado con biosólidos". *Ciencia del medio ambiente total*, 409(17): 3206-3210.
86. Laird, D., Fleming, P., Wang, B., Horton, R., Karlen, D. (2010). "Impacto del biochar en la lixiviación de nutrientes de un suelo agrícola del medio oeste". *Geoderma*, 158(3-4): 436-442.
87. Leavit, S. W. (1998). Biogeoquímica, en Análisis de Cambio Global. Eos, *Transacciones Unión Geofísica Americana*, 79(2), 20-20.
88. Lehmann, J., Gaunt, J., & Rondon, M. (2006). Secuestro de biocarbono en ecosistemas terrestres: una revisión. *Estrategias de mitigación y adaptación para el cambio global*, 11(2), 395-419.
89. Lehmann, J., Kern, D. C., Glaser, B., & Woods, W. I. (Eds.). (2007). Tierras oscuras amazónicas: gestión de propiedades y origen. Springer Science & Business Media. Recuperado de <http://www.springer.com/us/book/9781402018398>
90. Lehmann, J. (2007). *Bioenergía en el negro. Fronteras en Ecología y Medio Ambiente*, 5(7), 381-387.
91. Lehmann, J., & Schroth, G. (2003). Lixiviación de nutrientes. Árboles, cultivos y fertilidad del suelo. *CABI Publicaciones*. Wallingford, 151-166.
92. Lehmann, J. (2009). "Terra Preta de Indio". Enciclopedia de la Ciencias del suelo. Nueva York, USA: Taylor and Francis, 1: 1, 1-4
93. Lehmann, J., & Joseph, S. (Eds.). (2015). Biochar para la gestión ambiental: ciencia, tecnología e implementación. Routledge.

94. Lemaire G, Onillon B, Grosse G, Chartier M, Allirand JM. (1991). Distribución de nitrógeno dentro de un dosel de alfalfa durante el rebrote: relación con la distribución de la luz. *Ann Bot* (68):483-488.
95. Liou, T. H. (2010). Desarrollo de estructura mesoporosa y alta capacidad de adsorción de carbón activado a base de biomasa por activación de ácido fosfórico y cloruro de zinc. *Revista de Ingeniería Química*, 158(2), 129-142.
96. Maia, C.; Madari, B.; Novotny, E. 2011. Avances en Biochar Investigación en Brasil. *Suelos dinámicos, planta dinámica*. 5(1): 53–58.
97. Manikandan, A., Subramanian, K.S. (2013). "Urea Intercalated Biochar-a Producción y caracterización de fertilizantes de liberación lenta ". *Revista india de ciencia y tecnología*, 6(12), 5579-5584.
98. Martínez, F. J., Ojeda, D. B., Hernández, A. R., Martínez, J., & Quezada, G. (2011). EL exceso de nitratos: un problema actual en la agricultura. *Synthesis*. pp, 11-16.
99. Marsh, K.L., Sims, G.K., Mulvaney, R.L. (2005). "Disponibilidad de urea para bacterias autótrofas oxidantes de amoníaco en relación con el destino de la urea marcada con 14C y 15N añadida al suelo ". *Biología y fertilidad de los suelos*. 42(2): 137-145.
100. McClellan, A., Deenik, J., Uehara, G., & Antal, M. (2007). Efectos del carbón carbonizado de nuez de macadamia carbonizado en el crecimiento de las plantas y las propiedades químicas del suelo. 80(100), 120.
101. McLaughlin, H; Anderson, PS; Shields, FE; Reed, TB. 2009. Todos los Biochars no son iguales y cómo distinguirlos, en: 2 Presentado en la Conferencia Biochar de América del Norte, Boulder, Colorado, p. 36

102. McNeill, A., & Unkovich, M. (2007). El ciclo del nitrógeno en los ecosistemas terrestres. En el ciclo de nutrientes en los ecosistemas terrestres. (pp. 37-64). *Springer Berlin Heidelberg*.
103. Meisinger, J. J., Schepers, J. S., & Raun, W. R. (2008). Necesidad de nitrógeno en el cultivo y fertilización. Nitrógeno en sistemas agrícolas, (nitrogeninagric), 563-612.
104. Miranda, R. J. L., & Contreras, J. C. (2011). Efecto de biofertilizante (em-boskashi) sobre el crecimiento y rendimiento de rábano (*Raphanus sativus*). *La Calera*, 1(1), 26-29.
105. Mohammadi, K., Heidari, G., Nezhad, M.T.K., Ghamari, S., Sohrabi, Y. (2012). "Respuestas microbianas contrastantes del suelo a los sistemas de fertilización y labranza en la rizosfera de canola ". *Revista saudita de ciencias biológicas*, 19(3): 377-383.
106. Municipalidad de Lurín. 2015- "Historia de nuestro distrito". Recuperado de: <http://www.munilurin.gob.pe/distrito/historia-de-lurin.html>
107. Ofori, F., Pate, J. S., & Stern, W. R. (1987). Evaluación de la fijación de N₂ y la economía de nitrógeno de un sistema de cultivo intercalado de maíz / caupí utilizando métodos de dilución de 15 N. *Planta y suelo*, 102(2), 149-160.
108. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. – FAO. (1997). Lucha contra la contaminación agrícola de los recursos hídricos. Recuperado de. <http://www.fao.org/docrep/w2598s/w2598s05.htm>
109. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. – FAO. (2002). Agricultura mundial: hacia los años 2015/2030. Recuperado de <http://www.fao.org/docrep/004/y3557s/y3557s11.htm>

110. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. – FAO. (2012). Tendencias mundiales actuales de fertilizantes y perspectivas para el 2016. Recuperado de <ftp://ftp.fao.org/ag/agp/docs/cwfto16.pdf>
111. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. – FAO (2015a.). Los suelos están en peligro, pero la degradación puede revertirse. El crecimiento demográfico, la industrialización y el cambio climático, amenazan la salud del suelo. Recuperado de:
112. <http://www.fao.org/news/story/es/item/357165/icode/>
113. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. – FAO (2015b.). Tendencias mundiales de fertilizantes y perspectivas para el 2018. Roma. Recuperado de: <http://www.fao.org/publications>
114. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. – FAO. (2016). "Tendencias y perspectivas mundiales de los fertilizantes para 2019", FAO, Roma, Italia.
115. Olmo, M., Villar, R. (2015). "El biochar afecta la producción de fruta en ocho especies agronómicas a través de cambios en los rasgos de la raíz".
116. Orozco, P.F. (1999). La biología del nitrógeno, conceptos básicos sobre sus transformaciones biológicas. Tomo I. Publicaciones Universidad Nacional de Colombia. Medellín: 231 p.
117. Paredes, M. C. (2013). Fijación biológica de nitrógeno en leguminosas y gramíneas. Trabajo Final de Ingeniería en Producción Agropecuaria. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Católica Argentina.

118. Perdomo C., Barbazán M. (2010) Nitrógeno. Área de suelos y aguas. Catedra de fertilidad. Uruguay. Recuperado de: <http://www.fagro.edu.uy/~fertilidad/publica/Tomo%20N.pdf>
119. Pérez, A., García, M., Enríquez, J., Quero, A., Pérez, J., Garay, A. (2004). "Análisis de crecimiento, área foliar específica y concentración de nitrógeno en hojas de pasto "mulato" (Brachiaria híbrido, cv)". *Técnica Pecuaria en México*, 42(3):477-458.
120. Perú Fondo de Oportunidades. (2011). Diagnóstico de agricultura en el Perú – Informe Final.
121. Philippot, L., & Germon, J. C. (2005). Contribución de las bacterias al aporte inicial y al reciclaje de nitrógeno en los suelos. En *microorganismos en suelos: roles en génesis y funciones* (pp. 159-176). Springer Berlin Heidelberg.
122. Prendergast-Miller, M.T., Duvall, M., Sohi, S.P. (2014). "Las interacciones biochar-raíz están mediadas por el contenido de nutrientes bioquímicos y los impactos en la disponibilidad de nutrientes del suelo.". *Revista Europea de Ciencias del Suelo*. 65(1): 173-185.
123. Poorter, H., Garnier, E. (2007). "Importancia ecológica de la variación inherente en la tasa de crecimiento relativa y sus componentes". En: F.I. Pugnaire, F. Valladares (Eds.), *Manual de Ecología Funcional de Plantas*, (pp. 81–120). Nueva York, USA: Marcel Dekker.
124. Prosser, J.I. (2005). "Nitrógeno en suelos | Nitrificación". En: *Enciclopedia de suelos en el medio ambiente* (pp. 31-39). , Oxford, UK: Elsevier.

125. Rebolledo, A. E., López, G. P., Moreno, C. H., Collado, J. L., Alves, J. C., Pacheco, E. V., & Barra, J. D. E. (2016). Biocarbón (biochar) I: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo. *Revista terra latinoamericana*, 34(3), 367-382.
126. Rodríguez-Iturbe, I., Porporato, A. (2007). "Ecohidrología de ecosistemas controlados por agua: humedad del suelo y dinámica de las plantas". Cambridge, UK: Universidad de Cambridge.
127. Robertson, G. P., & Groffman, P. M. (2007). Transformaciones de nitrógeno. En *microbiología del suelo, ecología y bioquímica (tercera edición)* (pp. 341-364).
128. Rubio Gutiérrez, A. (2010). La densidad aparente en suelos forestales del Parque Natural Los Alcornocales.
129. Sánchez-García, M., Roig, A., Sánchez-Monedero, M. A., & Cayuela, M.L. (2014). El biochar aumenta las emisiones de N₂O del suelo producidas por vías mediadas por nitrificación. *Fronteras en Ciencias Ambientales*, 2.
130. Sahrawat, K.L. (2008). "Factores que afectan la nitrificación en los suelos". *Comunicaciones en ciencia del suelo y análisis de plantas*, 39(9-10): 1436-1446.
131. Saarnio, S., Heimonen, K., Kettunen, R. (2013). "La adición de biochar afecta indirectamente las emisiones de N₂O a través de la humedad del suelo y la absorción de N de la planta.". *Biología del suelo y bioquímica*, 58: 99-106.
132. Schomberg, H. H., Gaskin, J. W., Harris, K., Das, K., Novak, J., Busscher, W., Watt D., Woodroo, f R., Lima, I., Ahmedma M., Rehrah, D. & Xing B. (2012) Influencia del biochar en fracciones de nitrógeno en un suelo llano costero. *Revista de calidad ambiental*, 41(4), 1087-1095. Recuperado de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22751050>

133. Shenbagavalli, S., & Mahimairaja, S. (2012). Caracterización y efecto del biochar sobre la dinámica del nitrógeno y el carbono en el suelo. *Revista internacional de investigación biológica avanzada*, 2(2), 249-255.
134. Sika, M. P., & Hardie, A. G. (2014). Efecto del biochar de madera de pino sobre la lixiviación y disponibilidad de nitrato de amonio en un suelo arenoso sudafricano. *Revista europea de ciencia del suelo*, 65(1), 113-119.
135. Sistema de Información para la Gestión de Residuos Sólidos – SIGERSOL (2015). “SIGERSOL 2015”. Recuperado de: <http://sigersol.minam.gob.pe/2015/menu.php#>
136. Smith P, Bustamente M, Ahammad H, Clark H, Dong H, Elsiddig E, Tubiello F. (2014). Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra. En: Edenhofer O, PichsMadruga R, Sokona Y, Farahani E, Kadner S, Seyboth K, Adler A, Baum I, Brunner S, Eickemeier P, et al. (eds.). Universidad de Cambridge, Cambridge, UK y NY, USA
137. Schmidt HP, Taylor P. 2014). Pirólisis de la cortina de llama Kon-Tiki para la democratización de la producción de biochar. *Biochar J.*; 1:14–24.
138. Schmidt HP, Pandit BH, Martinsen V, Cornelissen G, Conte P, Kammann CI. (2015). Aumento cuádruple en el rendimiento de la calabaza en respuesta a la aplicación en zonas radicales de baja dosis de biochar mejorado con orina a un suelo tropical fértil. *Agricultura.5* (3):723–41.
139. Snyder, C. S., Bruulsema, T. W., Jensen, T. L., & Fixen, P. E. (2009). Revisión de las emisiones de gases de efecto invernadero de los sistemas de producción de cultivos y los efectos del manejo de fertilizantes. *Agricultura, ecosistemas y medio ambiente*, 133(3), 247-266.

140. Spalding, R. F., & Exner, M. E. (1993). Ocurrencia de nitrato en el agua subterránea: una revisión. *Revista de calidad ambiental*, 22(3), 392-402.
141. Spokas, K.A., Novak, J.M., Stewart, C.E., Cantrell, K.B., Uchimiya, M., DuSaire, M.G., R, K.S. (2011). "Análisis cualitativo de compuestos orgánicos volátiles en biochar". *Quimiosfera*, 85(5): 869-882
142. Spokas, K. A., Novak, J. M., Stewart, C. E., Cantrell, K. B., Uchimiya, M., DuSaire, M. G., & Ro, K. S. (2011). Análisis cualitativo de compuestos orgánicos volátiles en biochar. *Quimiosfera*, 85(5), 869-882.
143. Spokas, K.A., Novak, J.M., Venterea, R.T. (2012). "El papel de Biochar como un fertilizante N alternativo: captura de amoníaco". *Planta y suelo*, 350(1-2): 35-42.
144. Sohi, S., Lopez-Capel, E., Krull, E., & Bol, R. (2009). Biochar, cambio climático y suelo: una revisión para guiar la investigación futura. *Informe CSIRO de Ciencias de la Tierra y el Agua*, 5(09), 17-31.
145. Standards Australia. (2003). Composts, acondicionadores de suelo y acolchados Australian Standard T.
146. Steiner, C. (2007). Las enmiendas de carbón vegetal mantienen la fertilidad del suelo y establecen un sumidero de carbono: investigaciones y perspectivas. *Ecología del suelo y desarrollos de investigación*, 1-6.
147. Steiner, C., Das, K. C., Melear, N., & Lakly, D. (2010) Reducción de la pérdida de nitrógeno durante el compostaje de desechos de aves de corral utilizando biochar. *Revista de calidad ambiental*, 39(4), 1236-1242.
148. Stern I, Kaufmann K (2014). Causas antropogénicas y naturales del cambio climático. *Cambio climático*. 122:257–269

149. Teruel, D. (1995). Modelado del índice de área foliar de la caña de azúcar en diferentes regímenes hídricos. Tesis M. Sc. Escuela Superior de Agricultura, ESALQ, Piracicaba.
150. Thies, J.E., Rillig, M.C. (2009). "Características del biochar: propiedades biológicas". Biochar para la gestión ambiental: ciencia y tecnología, 85-105.
151. Ulyett, J., Sakrabani, R., Kibblewhite, M., Hann, M. (2014). "Impacto de la adición de biochar en la retención de agua, nitrificación y desprendimiento de dióxido de carbono de dos suelos francos arenosos". Revista Europea de Ciencia del Suelo, 65(1): 96-104.
152. Utomo, W.H., Guritno, B., Soehono, L.A. (2012). "El efecto del biochar sobre el crecimiento y el requerimiento de fertilizantes de N del maíz (*Zea mays* L.) en el experimento de invernadero". Revista de Ciencias Agrícolas, 4(5), 255
153. Vaccari, D.A., Strom, P.F., Alleman, J.E. (2005). "Transformaciones microbianas". Biología ambiental para ingenieros y científicos. 387-441. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons.
154. Van Zwieten, L. Kimber S., Morris, S., Chan, K., Downie, A., Rust, J., Joseph, S., Cowie, A. (2010a.). Efectos del biochar de la pirólisis lenta del papel usado en el rendimiento agronómico y la fertilidad del suelo. Suelo vegetal. 327:235–246.
155. Van Zwieten, L., Kimber, S., Downie, A., Morris, S., Petty, S., Rust, J., & Chan, K. (2010b.). Un estudio de invernadero sobre la interacción del biochar bajo en cenizas minerales con nitrógeno en un suelo arenoso. Investigación de suelos, 48(7), 569-576.
156. Vásquez, E., Ladd, B., & Borchard, N. (2014). Alto almacenamiento de carbono en el bosque de *Polylepis* en los Andes peruanos. Botánica alpina, 124(1), 71-75.

157. Vassilev, N., Martos, E., Mendes, G., Martos, V., & Vassileva, M. (2013). Biochar de origen animal: ¿una solución sostenible al problema global de la escasez de fosfato de roca de alto grado?. *Revista de la Ciencia de la Alimentación y la Agricultura*, 93(8), 1799-1804.
158. Verheijen, F., Jeffery, S., Bastos, A. C., Van der Velde, M., & Diafas, I. (2010). Aplicación de biochar a suelos. Una revisión científica crítica de los efectos sobre las propiedades, procesos y funciones del suelo. *EUR*, 24099, 162.
159. Verheijen, F., Jeffery, S., Bastos, A., Van Der Velde, M., & Diafas, I. (2010). Aplicación de biochar a los suelos: una revisión científica crítica de los efectos sobre las propiedades del suelo. *Procesos y funciones*, Centro Común de Investigación de la Comisión Europea para Informes Científicos y Técnicos, 51-68.
160. Verheijen, F., Montanarella, L., Bastos, A.C. (2012). "Sostenibilidad, certificación y regulación del biochar", *Investigación Agrícola Brasileña*, 47, 649-653.
161. Vitousek, P., & Matson, P. (1985). Perturbación, disponibilidad de nitrógeno y pérdidas de nitrógeno en una plantación de pinos manejada de manera intensiva. *Ecología*, 1360-1376.
162. Vitousek, P. M., Aber, J., Howarth, R., Likens, G., Matson, P., Schindler, D., Schlesinger W., & Tilman, D. (1997). Alteración humana del ciclo global del nitrógeno: fuentes y consecuencias. *Aplicaciones ecológicas*, 7(3), 737-750.
163. Wagner, S.C. (2011). "Fijación biológica de nitrógeno". *Conocimiento de la educación de la naturaleza*, 3(10): 15.

164. Wrage, N., Velthof, G.L., Van Beusichem, M.L., Oenema, O. (2001). "Papel de la desnitrificación de nitrificador en la producción de óxido nitroso". *Biología del suelo y bioquímica*. 33(12–13): 1723-1732.
165. Widowati, W. y Asnah, A. (2014). "Biochar puede mejorar la eficiencia de fertilización de potasio y la viabilidad económica del cultivo de maíz". *Revista de la ciencias de la Agricultura*, 6(2).
166. Willard H., Merrit L. & Dean J. (1974). *Métodos instrumentales de análisis*. 5ta edición Van Nostrand.
167. Woods, W. (2003). "Development of Anthrosol Research". En: J. Lehmann, D. Kern, B. Glaser, W. Woods (Eds.) *Tierras oscuras amazónicas: Origen, propiedades, gestión* (pp. 3-14). Dordrecht, Países Bajos: Kluwer Academic Publishers.
- Wrage, N., Velthof, G.L., Van Beusichem, M.L., Oenema, O. (2001). "Papel de la desnitrificación de nitrificadores en la producción de óxido nitroso". *Biología del suelo y bioquímica*, 33(12–13): 1723-1732.
168. Western Ag. (s.f.a). "Tecnología PRS: conceptos básicos". Recuperado de: <http://www.westernag.ca/innovations/technology/basics>
169. Western Ag. (s.f.b). "Tecnología PRS: sumideros competitivos". Recuperado de: <https://www.westernag.ca/innovations/technology/dynamics/factors-affecting/competing-sinks>
170. Western Ag. (s.f.c). "Tecnología PRS: análisis". Recuperado de: https://www.westernag.ca/innovations/technology/analysis_units
171. Western Ag. (s.f.d). "Tecnología PRS: Unidades". Recuperado de: <https://www.westernag.ca/innovations/technology/units>

172. Xu, G., Sun, J., Shao, H., Chang, S.X. (2014). "El biochar tuvo efectos sobre la sorción y la desorción de fósforo en tres suelos con acidez diferente". *Ingeniería Ecológica*, 62: 54-60.
173. Yaman, S. (2004). Pirólisis de biomasa para producir combustibles y materias primas químicas. *Conversión y gestión de energía*, 45(5), 651-671.
174. Yamato, M., Okimori, Y., Wibowo, I. F., Anshori, S., & Ogawa, M. (2006). Efectos de la aplicación de corteza carbonizada de *Acacia mangium* sobre el rendimiento de maíz, caupí y maní, y propiedades químicas del suelo en el sur de Sumatra, Indonesia. *Ciencia del suelo y nutrición vegetal*, 52(4), 489-495. Recuperado de <http://www.biochar-international.org/node/496>
175. Yamoah, C. F., Bationo, A., Shapiro, B., & Koala, S. (2002). Análisis de tendencia y estabilidad de los rendimientos de mijo tratados con fertilizantes y residuos de cultivos en el Sahel. *Investigación de cultivos de campo*, 75(1), 53-62.
176. Yao, Y., Gao, B., Zhang, M., Inyang, M, Zimmerman, A.R. (2012). "Efecto de la enmienda de biochar sobre la sorción y la lixiviación de nitrato, amonio y fosfato en un suelo arenoso". *Quimiosfera*, 89(11): 1467-1471.
177. Yara. (2015). Ficha técnica de Urea Granulada. Recuperado de: [http://www.yara.com.pe/images/FTGTec1001-Urea%20agr%C3%ADcola%20\(Ver%2003\)_tcm581-206491.pdf](http://www.yara.com.pe/images/FTGTec1001-Urea%20agr%C3%ADcola%20(Ver%2003)_tcm581-206491.pdf)
178. Yuan W., S. Yuan, Q. Wang, C. Gan, Y. Liu. S. Mei. 2014. Efectos de diferentes cantidades de N-fertilizantes en el crecimiento, rendimiento de raíz y contenido de nitrato de rábanos blancos al Sur China. *J. Food.Agric.Environ.* 12(1), 302-304

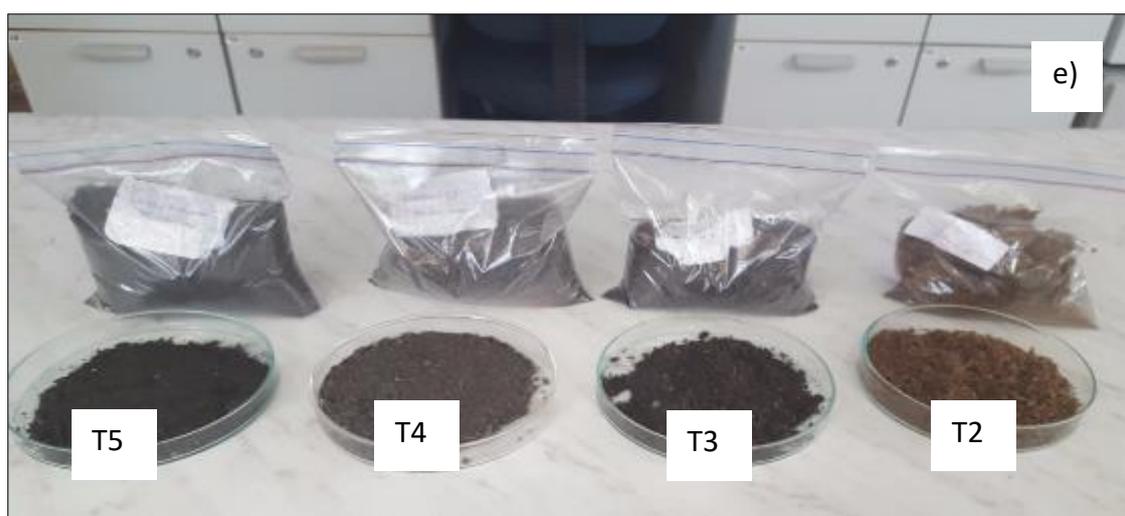
179. Zhao, W., Zhang, J., Müller, C., Cai, Z. (2016). “Mecanismos detrás de la estimulación de la nitrificación por el aporte de N en el suelo del bosque de ácido subtropical”. *Diario de suelos y sedimentos*: 1-8.
180. Zheng, W., Sharma, B. K., & Rajagopalan, N. (2010). *Uso del biochar como enmienda del suelo para una agricultura sostenible*. Centro de Tecnología Sostenible de Illinois Universidad de Illinois en Urbana-Champaign. 36 p.

X. ABREVIATURAS

- CIC: Intercambio catiónico
- COV: Compuestos orgánicos volátiles
- CODISEC: Comité Distrital de Seguridad Ciudadana
- EPA: Agencia de Protección ambiental
- FAO: Organización para las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
- HAP: Hidrocarburos aromáticos poli cíclicos
- IFA: Asociación Internacional de la Industria de Fertilizantes
- INEI: Instituto Nacional de Estadística e Informática
- MOS: Materia orgánica del suelo
- pH: potencial de hidrógeno
- PRS: Sondas Simuladoras de Raíces
- SIGERSOL: Sistema de Información para la Gestión de Residuos Sólidos
- SLA: Área Foliar Especifica

XI. ANEXOS

Anexo 1 Producción del biochar y mezcla de biochar con urea



a) Residuos verdes, b) Purín sólido de cerdo, c) Producción de biochar en el horno tipo Kontiki,
d) Biochar y e) los tratamientos usados en la experimentación

Anexo 2. Montaje del experimento



a) Delimitación del área a usar para la experimentación y b) Distribución de tubos de PVC para la exclusión del cultivo en 10 bloques completamente al azar.

Anexo 3. Sondas PRS



a) Sondas PRS y b) Ubicación de sondas PRS dentro de cada tubo de exclusión.

Anexo 4. Ciclos del cultivo



a) Primer ciclo del cultivo, b) Segundo ciclo del cultivo y c) Tercer ciclo del cultivo

Anexo 5. Cosechas de los diferentes tratamientos



a) T1: control, b) T2: Purín de cerdo, c) T3: Biochar, d) T4: Biochar con pH ajustado a neutro y d) T5: Biochar con pH ajustado a neutro con un ajuste de concentración de N a base de urea granulada

Anexo 6. Datos meteorológicos de la Estación Antonio Raimondi – 472A218A

Temperatura (°C) para el primer ciclo del cultivo

Primer ciclo del cultivo 2016			
Día	Temperatura (°C)		
	Promedio	Máx	Mín
26/04/2016	22.7	28.3	17.3
27/04/2016	21.21	26.6	17.3
28/04/2016	21.27	26.5	17.3
29/04/2016	22.44	29.1	17.2
30/04/2016	19.23	22.1	17.8
1/05/2016	22.2	29.2	16.5
2/05/2016	22.25	28.4	17.1
3/05/2016	21.81	27.2	17.2
4/05/2016	21.52	29.6	16.5
5/05/2016	21.41	28.1	16.6
6/05/2016	20.58	26.5	15.8
7/05/2016	20.14	26	15.8
8/05/2016	20.43	28	16.1
9/05/2016	20.54	27.2	16.4
10/05/2016	20.86	26.6	16.5
11/05/2016	21.58	28.9	16.2
12/05/2016	20.46	26	16
13/05/2016	20.09	27.2	15.8
14/05/2016	18.24	21.1	15.2
15/05/2016	18.72	23.6	14.8
16/05/2016	18.98	23.8	14.8
17/05/2016	19.68	25.5	15.6
18/05/2016	19.59	24.6	16.2
19/05/2016	19.31	24.6	15.9

Primer ciclo del cultivo 2016			
Día	Temperatura (°C)		
	Promedio	Máx	Mín
20/05/2016	18.83	23.7	15.8
21/05/2016	18.71	23.6	15.3
22/05/2016	17.89	24.4	15
23/05/2016	19.08	23.3	16.8
24/05/2016	19.71	25.7	16.8
25/05/2016	19.36	25.8	15.4
26/05/2016	17.82	22.9	15
27/05/2016	18.02	24.1	15
28/05/2016	17.31	24.7	13.8
29/05/2016	18.14	24.6	14
30/05/2016	17.31	25.7	13.8
31/05/2016	17.38	24.7	14.3
1/06/2016	-	-	14
2/06/2016	-	-	16.1
3/06/2016	-	-	14.9
4/06/2016	-	-	-
5/06/2016	17.75	22.7	15.1
6/06/2016	17.09	22.6	13
7/06/2016	16.25	21.5	12.8
8/06/2016	17.73	24.6	14.5
9/06/2016	17.31	21.5	15.1
10/06/2016	17.65	22.8	14.4
11/06/2016	17.65	24	14.8
12/06/2016	17.93	23.7	14.5
13/06/2016	17.47	23.7	13.6
14/06/2016	17.93	23.8	13.1
15/06/2016	17.32	22.1	14.4

Primer ciclo del cultivo 2016			
Día	Temperatura (°C)		
	Promedio	Máx	Mín
16/06/2016	17.9	22.2	15.7
17/06/2016	16.34	19.3	12.7
18/06/2016	16.76	19.9	12.1
19/06/2016	17.4	21.3	13.6
20/06/2016	15.26	19.1	12.5
21/06/2016	14.85	17.5	11.4
22/06/2016	15.61	16.9	14.8
23/06/2016	15.64	16.8	14.9
24/06/2016	16.59	21.2	14.7
25/06/2016	16.69	21.6	12.9
26/06/2016	16.48	18.9	15.2
27/06/2016	16.65	20.3	14.6
28/06/2016	16.42	20.8	15.4
29/06/2016	15.92	17.4	15.3
Promedio	18.61	23.84	15.14

FUENTE: SENAMHI, 2016. *(-) Datos que no existen

Anexo 7. Datos meteorológicos de la Estación Antonio Raimondi – 472A218A

Temperatura (°C) para el segundo ciclo del cultivo

Segundo ciclo del cultivo 2016			
Día	Temperatura (°C)		
	Promedio	Máx	Mín
5/07/2016	16.55	18.4	15.5
6/07/2016	16.02	17.9	15
7/07/2016	16.42	19.9	13.9
8/07/2016	15.95	17	15.3
9/07/2016	16.37	19	14.8
10/07/2016	17.04	19.3	15.6
11/07/2016	17.34	20.4	15.9
12/07/2016	16.53	19.2	15.3
13/07/2016	17.09	20.1	15.4
14/07/2016	16.44	17.6	15.8
15/07/2016	16.18	17.8	15.8
16/07/2016	16.06	18.8	14.7
17/07/2016	16.47	19.5	14.9
18/07/2016	15.74	17	14.7
19/07/2016	15.52	18.7	14.2
20/07/2016	15.96	19	14.2
21/07/2016	15.85	17.3	14.9
22/07/2016	15.91	19.1	14.7
23/07/2016	-	-	-
24/07/2016	16.92	19.5	15.2
25/07/2016	16.26	19.8	13.9
26/07/2016	15.69	18.4	14.4
27/07/2016	16.77	21.4	14.9
28/07/2016	16.08	20.08	12.7

Segundo ciclo del cultivo 2016			
Día	Temperatura (°C)		
	Promedio	Máx	Mín
29/07/2016	16.22	20.9	13.7
30/07/2016	16.28	20.5	12.2
31/07/2016	16.46	22.5	12
1/08/2016	16.2	20.7	12.9
2/08/2016	15.62	18.5	14.6
3/08/2016	16.03	18.4	14.2
4/08/2016	15.33	18	12.2
5/08/2016	15.63	19.7	11.9
6/08/2016	15.9	18.2	14.8
7/08/2016	15.41	17	14.6
8/08/2016	15.96	18.3	14.2
9/08/2016	15.7	20.8	12.8
10/08/2016	15.47	19.9	11.5
11/08/2016	15.57	18.7	12.6
12/08/2016	15.53	18.4	14.1
13/08/2016	16.36	19.9	14.9
14/08/2016	16.19	20	14.2
15/08/2016	15.09	14	14.1
16/08/2016	15.69	18.2	14.3
17/08/2016	16.54	20.6	14.7
18/08/2016	16.25	20.8	14
19/08/2016	15.33	16.7	14.6
20/08/2016	14.9	15.9	14.1
21/08/2016	16.24	22.3	13.2
22/08/2016	16.71	22.1	13.9
23/08/2016	16.37	19.6	13.3
24/08/2016	16.28	19.1	14.3

Segundo ciclo del cultivo 2016			
Día	Temperatura (°C)		
	Promedio	Máx	Mín
25/08/2016	17.05	21.3	14.9
26/08/2016	16.08	20.6	14.5
27/08/2016	15.83	19.6	14.7
28/08/2016	17.03	23.1	14.2
29/08/2016	16.5	21.1	12.7
30/08/2016	15.28	16.3	14.5
31/08/2016	15.55	16.9	14.4
1/09/2016	15.57	17.2	14.4
2/09/2016	15.92	21.6	14.3
3/09/2016	16.38	20.6	14.4
4/09/2016	15.84	18	14.7
5/09/2016	15.85	18.5	14.7
6/09/2016	15.8	21.1	13.9
7/09/2016	16.75	20.7	14.6
8/09/2016	15.82	19.3	14.3
9/09/2016	16.24	20.9	12.5
Promedio	16.09	19.27	14.20

FUENTE: SENAMHI, 2016. *(-) Datos que no existen

Anexo 8. Datos meteorológicos de la Estación Antonio Raimondi – 472A218A

Temperatura (°C) para el tercer ciclo del cultivo

Tercer ciclo del cultivo 2016			
Día	Temperatura (°C)		
	Promedio	Máx	Mín
16/09/2016	16.04	18.5	14.9
17/09/2016	17.51	23.6	14.6
18/09/2016	17.81	25.5	12.7
19/09/2016	17.68	23	14.9
20/09/2016	17.3	21.4	14.9
21/09/2016	16.73	19.9	15.1
22/09/2016	17.47	21.5	15.4
23/09/2016	17.11	20.3	15.1
24/09/2016	17.71	23.1	15.2
25/09/2016	16.28	17.7	15.4
26/09/2016	17.46	22.2	14.5
27/09/2016	17.29	21.3	14.9
28/09/2016	17.72	22.3	14.8
29/09/2016	16.84	18.6	15.3
30/09/2016	17	20	15.9
1/10/2016	17.31	21.3	15.3
2/10/2016	17.84	22	15.6
3/10/2016	17.43	20.5	15.5
4/10/2016	17.04	19.9	15.3
5/10/2016	16.5	19	14.7
6/10/2016	17.43	21.4	13.8
7/10/2016	17.4	22.6	13.1
8/10/2016	16.97	21.4	13.8
9/10/2016	18.12	23.3	15.7

Tercer ciclo del cultivo 2016			
Día	Temperatura (°C)		
	Promedio	Máx	Mín
10/10/2016	18.38	23.8	14.4
11/10/2016	18.55	22.8	15.3
12/10/2016	18.23	23.1	15
13/10/2016	17.54	22.1	14.1
14/10/2016	17.91	23.2	13.8
15/10/2016	16.99	20	13.3
16/10/2016	18.23	22.7	15.5
17/10/2016	17.57	22.9	13.8
18/10/2016	18.42	24.1	15.3
19/10/2016	18.45	23.7	15.8
20/10/2016	18.51	24.8	15.6
21/10/2016	17.27	21.3	15
22/10/2016	17.96	22	14.7
23/10/2016	16.3	17.4	15.7
24/10/2016	20.4	21.4	15.4
25/10/2016	17.53	21.4	18.8
26/10/2016	17.55	23.3	14
27/10/2016	16.69	20.4	14.8
28/10/2016	17.85	21.3	15.3
29/10/2016	17.81	22.3	15.3
30/10/2016	18.61	22.5	16.3
31/10/2016	18.02	22.5	13.8
1/11/2016	18	22.4	13.7
2/11/2016	16.9	22.5	13.7
3/11/2016	17.23	23.3	11.7
4/11/2016	17.87	23.9	13.2
5/11/2016	17.98	21.8	14.5

Tercer ciclo del cultivo 2016			
Día	Temperatura (°C)		
	Promedio	Máx	Mín
6/11/2016	17.19	19.7	14.5
7/11/2016	19.68	25	14.9
8/11/2016	19.14	24.4	13.7
9/11/2016	19.26	25.5	15.2
10/11/2016	19.33	25	15
11/11/2016	19.21	23.7	16.7
12/11/2016	19.93	25.5	14.3
13/11/2016	19.22	24.7	14.3
14/11/2016	20.55	25.2	17.7
15/11/2016	19.97	25	15.4
16/11/2016	19.53	25	15.4
17/11/2016	19.6	27.2	13.9
18/11/2016	19.59	24.7	13.7
19/11/2016	19.03	24.5	13.4
20/11/2016	19.68	24.6	15.4
Promedio	20.67	25.9	14.8

FUENTE: SENAMHI, 2016. *(-) Datos que no existen

Anexo 9. Resultado del primer ciclo del cultivo

N°	Tratamiento	Bloque	Biomasa vegetativa total (T/ha)	N absorbido por biomasa total (kg/ha)	Largo de la hoja (cm)	Área de la hoja (cm ²)	SLA (cm ² /g)
1	T1	B1	5.13	235.05	3.80	46.53	65.54
2	T1	B2	3.54	150.57	2.70	35.49	75.51
3	T1	B3	2.21	52.71	3.50	24.95	207.92
4	T1	B4	2.78	91.90	5.90	18.15	69.81
5	T1	B5	1.50	39.99	2.90	19.76	219.56
6	T1	B6	7.00	302.75	4.30	56.30	52.62
7	T1	B7	1.71	30.71	3.80	32.00	533.33
8	T1	B8	6.77	230.49	4.80	54.25	82.20
9	T1	B9	1.81	47.42	3.90	25.06	119.33
10	T1	B10	2.19	79.53	2.80	17.79	74.13
11	T2	B1	2.23	75.36	3.20	35.40	196.67
12	T2	B2	5.28	279.30	2.00	67.38	66.71
13	T2	B3	3.90	204.32	4.10	51.25	76.49
14	T2	B4	3.99	148.59	9.00	39.04	79.67
15	T2	B5	3.79	70.22	4.20	19.93	132.87
16	T2	B6	3.07	126.11	5.90	39.51	106.78
17	T2	B7	2.04	63.07	1.50	25.07	208.92
18	T2	B8	7.47	343.18	4.50	66.90	65.59
19	T2	B9	3.60	118.21	5.50	27.64	62.82
20	T2	B10	N.E	N.E	N.E	N.E	N.E
21	T3	B1	7.35	403.13	8.00	68.41	62.76
22	T3	B2	7.93	264.79	11.00	76.88	73.22
23	T3	B3	7.07	329.23	12.00	65.27	63.37
24	T3	B4	7.20	378.57	10.50	58.95	40.66
25	T3	B5	5.28	266.29	7.00	47.65	56.06

N°	Tratamiento	Bloque	Biomasa vegetativa total (T/ha)	N absorbido por biomasa total (kg/ha)	Largo de la hoja (cm)	Área de la hoja (cm ²)	SLA (cm ² /g)
26	T3	B6	3.24	137.23	6.00	23.04	65.83
27	T3	B7	4.19	175.03	6.00	47.74	99.46
28	T3	B8	7.73	269.58	11.33	69.18	94.77
29	T3	B9	4.06	130.20	12.00	61.14	210.83
30	T3	B10	10.12	498.29	8.50	65.62	52.08
31	T4	B1	6.74	312.61	8.00	61.87	67.99
32	T4	B2	3.82	139.09	8.50	45.02	97.87
33	T4	B3	4.81	235.65	7.00	33.80	50.45
34	T4	B4	6.09	301.20	4.00	41.15	49.58
35	T4	B5	2.81	158.00	4.50	20.50	47.67
36	T4	B6	6.39	356.49	3.50	45.13	42.18
37	T4	B7	7.25	399.04	9.00	47.40	47.88
38	T4	B8	5.32	222.95	6.00	36.25	55.77
39	T4	B9	6.98	380.11	8.00	39.39	63.53
40	T4	B10	3.40	133.69	9.00	44.48	101.09
41	T5	B1	9.41	406.38	10.50	89.51	65.82
42	T5	B2	2.70	97.85	6.40	62.72	224.00
43	T5	B3	6.46	273.57	7.50	37.10	43.65
44	T5	B4	6.80	321.13	7.20	24.45	25.21
45	T5	B5	4.84	176.27	7.00	36.09	50.13
46	T5	B6	9.54	407.91	10.00	55.66	44.17
47	T5	B7	7.29	280.37	8.30	72.92	92.30
48	T5	B8	10.44	436.58	14.70	86.50	68.65
49	T5	B9	17.63	737.31	14.00	122.70	64.24
50	T5	B10	9.25	333.56	13.10	59.92	55.48

*(N.E) Son datos que no existen

Anexo 10. Resultado del segundo ciclo del cultivo

N°	Tratamiento	Bloque	Biomasa vegetativa total (T/ha)	N absorbido por biomasa total (kg/ha)	Largo de la hoja (cm)	Área de la hoja (cm ²)	SLA (cm ² /g)
1	T1	B1	0.99	22.24	4.00	15.26	1064.44
2	T1	B2	0.49	11.75	3.50	7.42	342.46
3	T1	B3	1.20	35.20	4.70	11.68	152.28
4	T1	B4	1.29	29.63	5.50	22.12	1185.16
5	T1	B5	1.40	21.55	4.50	20.50	2928.57
6	T1	B6	2.48	127.29	5.00	20.30	114.92
7	T1	B7	1.02	35.02	3.90	16.33	257.76
8	T1	B8	3.71	204.33	4.00	27.97	95.35
9	T1	B9	0.92	26.63	4.50	9.24	294.73
10	T1	B10	1.20	50.85	4.00	8.36	139.28
11	T2	B1	1.09	42.44	3.50	9.33	548.53
12	T2	B2	0.56	15.46	1.90	3.45	156.82
13	T2	B3	N.E	N.E	N.E	N.E	N.E
14	T2	B4	2.00	72.90	8.00	27.37	216.07
15	T2	B5	3.56	147.83	7.00	24.75	121.70
16	T2	B6	1.74	73.82	4.50	13.91	134.64
17	T2	B7	1.52	69.04	4.50	11.96	119.63
18	T2	B8	4.71	193.02	8.00	25.83	109.14
19	T2	B9	2.65	69.77	9.00	24.57	351.06
20	T2	B10	N.E	N.E	N.E	N.E	N.E
21	T3	B1	N.E	N.E	N.E	N.E	N.E
22	T3	B2	4.58	161.88	8.00	46.13	194.92
23	T3	B3	3.83	133.57	8.40	64.16	418.42
24	T3	B4	N.E	N.E	N.E	N.E	N.E
25	T3	B5	3.86	159.38	4.50	29.49	104.08

N°	Tratamiento	Bloque	Biomasa vegetativa total (T/ha)	N absorbido por biomasa total (kg/ha)	Largo de la hoja (cm)	Área de la hoja (cm ²)	SLA (cm ² /g)
26	T3	B6	2.00	101.81	5.00	14.24	122.04
27	T3	B7	3.75	145.37	8.30	42.22	263.84
28	T3	B8	5.69	186.59	7.00	34.55	142.00
29	T3	B9	5.61	191.49	9.50	23.57	243.85
30	T3	B10	5.58	272.11	5.50	39.95	95.13
31	T4	B1	5.56	159.05	6.40	28.07	92.55
32	T4	B2	2.80	72.03	9.00	44.92	449.21
33	T4	B3	2.63	91.65	4.50	14.38	105.24
34	T4	B4	3.07	127.24	4.20	26.70	121.37
35	T4	B5	2.53	46.83	5.00	13.97	199.63
36	T4	B6	4.68	255.19	5.00	34.67	97.21
37	T4	B7	3.06	130.14	5.40	22.02	111.98
38	T4	B8	N.E	N.E	N.E	N.E	N.E
39	T4	B9	8.62	293.30	10.00	67.15	148.34
40	T4	B10	9.46	339.44	6.00	22.06	75.45
41	T5	B1	5.79	189.02	8.00	22.63	84.00
42	T5	B2	N.E	N.E	N.E	N.E	N.E
43	T5	B3	6.31	212.63	8.50	23.09	121.54
44	T5	B4	4.52	137.74	5.50	27.79	181.27
45	T5	B5	2.22	78.75	10.00	16.83	153.04
46	T5	B6	3.72	183.26	7.50	39.34	159.47
47	T5	B7	4.66	202.58	15.00	29.61	105.76
48	T5	B8	10.53	362.86	9.57	42.16	122.81
49	T5	B9	13.04	504.97	10.33	51.55	80.96
50	T5	B10	8.04	259.29	10.00	33.50	115.51

*(N.E) Son datos que no existen

Anexo 11. Resultado del tercer ciclo del cultivo

N°	Tratamiento	Bloque	Biomasa vegetativa total (T/ha)	N absorbido por biomasa total (kg/ha)	Largo de la hoja (cm)	Área de la hoja (cm ²)	SLA (cm ² /g)
1	T1	B1	3.95	11.40	3.00	16.87	250.78
2	T1	B2	1.76	4.39	4.00	18.00	37.83
3	T1	B3	3.00	10.05	3.50	11.78	233.30
4	T1	B4	6.40	18.20	4.20	25.96	242.65
5	T1	B5	4.39	14.07	5.00	17.47	242.24
6	T1	B6	2.32	5.87	8.50	13.42	108.71
7	T1	B7	1.28	2.08	3.70	15.63	20.23
8	T1	B8	1.89	5.46	6.00	15.79	73.91
9	T1	B9	1.92	4.71	2.20	4.31	304.95
10	T1	B10	1.96	5.70	4.20	8.93	166.13
11	T2	B1	3.45	12.71	6.80	13.11	231.80
12	T2	B2	5.24	14.29	6.10	21.38	184.28
13	T2	B3	5.17	17.82	8.00	25.45	219.76
14	T2	B4	3.26	6.12	5.60	31.22	67.76
15	T2	B5	1.09	2.25	4.50	47.49	12.29
16	T2	B6	5.72	19.50	1.00	24.52	124.97
17	T2	B7	2.57	7.48	7.75	34.43	57.20
18	T2	B8	N.E	N.E	N.E	N.E	N.E
19	T2	B9	4.65	14.61	3.00	15.77	254.41
20	T2	B10	N.E	N.E	N.E	N.E	N.E
21	T3	B1	N.E	N.E	N.E	N.E	N.E
22	T3	B2	5.94	19.60	5.50	21.01	194.48
23	T3	B3	9.24	31.59	6.57	28.80	309.03
24	T3	B4	N.E	N.E	N.E	N.E	N.E
25	T3	B5	3.93	10.60	5.50	22.46	116.94
26	T3	B6	N.E	N.E	N.E	N.E	N.E

N°	Tratamiento	Bloque	Biomasa vegetativa total (T/ha)	N absorbido por biomasa total (kg/ha)	Largo de la hoja (cm)	Área de la hoja (cm ²)	SLA (cm ² /g)
27	T3	B7	10.90	33.53	6.40	21.53	417.97
28	T3	B8	5.95	17.61	7.00	19.40	225.68
29	T3	B9	8.83	30.45	8.00	40.01	188.40
30	T3	B10	6.79	23.39	6.50	22.62	267.67
31	T4	B1	N.E	N.E	N.E	N.E	N.E
32	T4	B2	11.11	36.82	7.80	29.00	290.68
33	T4	B3	N.E	N.E	N.E	N.E	N.E
34	T4	B4	N.E	N.E	N.E	N.E	N.E
35	T4	B5	7.33	25.03	6.50	26.69	252.78
36	T4	B6	6.50	25.82	6.50	26.70	176.17
37	T4	B7	7.07	30.63	6.00	12.12	491.64
38	T4	B8	N.E	N.E	N.E	N.E	N.E
39	T4	B9	5.53	20.18	4.50	10.28	493.49
40	T4	B10	5.31	15.37	6.30	14.07	292.02
41	T5	B1	N.E	N.E	N.E	N.E	N.E
42	T5	B2	N.E	N.E	N.E	N.E	N.E
43	T5	B3	6.71	21.23	8.20	45.60	109.33
44	T5	B4	N.E	N.E	N.E	N.E	N.E
45	T5	B5	6.95	15.20	3.30	6.29	950.73
46	T5	B6	9.42	30.30	8.50	34.12	277.96
47	T5	B7	5.42	16.46	4.50	29.89	112.29
48	T5	B8	10.05	33.39	8.00	35.19	244.61
49	T5	B9	7.51	22.84	5.00	23.95	225.37
50	T5	B10	8.04	259.29	10.00	33.50	115.51

*(N.E) Son datos que no existen

Anexo 12. Resultado del Stock final de N en el suelo

N°	Tratamiento	Densidad aparente (g/cm ³)	Profundidad (cm)	Stock final de N en el suelo luego de los 3 ciclos del cultivo (kg/ha)	Stock inicial inorgánico asimilable en el suelo (kg/ha)
1	T1	1.019	10	1120.45	22.41
2	T1	1.019	10	1018.59	20.37
3	T1	0.806	10	725.74	14.51
4	T1	1.231	10	492.32	9.85
5	T1	0.722	10	432.90	8.66
6	T1	0.891	10	802.14	16.04
7	T1	1.103	10	1213.82	24.28
8	T1	1.061	10	742.72	14.85
9	T1	1.061	10	1061.03	21.22
10	T1	0.891	10	980.39	19.61
11	T2	1.103	10	1213.82	24.28
12	T2	0.976	10	1073.76	21.48
13	T2	1.061	10	848.82	16.98
14	T2	1.103	10	772.43	15.45
15	T2	1.019	10	407.44	8.15
16	T2	1.188	10	950.68	19.01
17	T2	1.146	10	458.37	9.17
18	T2	1.188	10	831.85	16.64
19	T2	1.103	10	1324.17	26.48
20	T2	0.976	10	1073.76	21.48
21	T3	1.019	10	916.73	18.33
22	T3	1.188	10	1188.35	23.77
23	T3	1.103	10	1103.47	22.07
24	T3	1.103	10	662.08	13.24
25	T3	1.231	10	615.40	12.31

N°	Tratamiento	Densidad aparente (g/cm ³)	Profundidad (cm)	Stock final de N en el suelo luego de los 3 ciclos del cultivo (kg/ha)	Stock inicial inorgánico asimilable en el suelo (kg/ha)
26	T3	1.188	10	356.51	7.13
27	T3	0.934	10	560.22	11.20
28	T3	1.188	10	594.18	11.88
29	T3	0.891	10	891.27	17.83
30	T3	0.934	10	840.34	16.81
31	T4	0.891	10	534.76	10.70
32	T4	1.146	10	1145.91	22.92
33	T4	1.061	10	636.62	12.73
34	T4	1.146	10	687.55	13.75
35	T4	1.188	10	594.18	11.88
36	T4	1.316	10	789.41	15.79
37	T4	1.061	10	636.62	12.73
38	T4	1.273	10	1018.59	20.37
39	T4	1.188	10	1188.35	23.77
40	T4	0.976	10	976.15	19.52
41	T5	1.103	10	993.12	19.86
42	T5	1.188	10	1188.35	23.77
43	T5	1.103	10	772.43	15.45
44	T5	1.188	10	713.01	14.26
45	T5	1.061	10	742.72	14.85
46	T5	1.188	10	831.85	16.64
47	T5	1.273	10	763.94	15.28
48	T5	1.146	10	458.37	9.17
49	T5	0.891	10	891.27	17.83
50	T5	0.849	10	848.82	16.98

*(N.E) Son datos que no existen

Anexo 13. Balance de N

N°	T	Stock inicial total de N en el Suelo (Kg/ha)	Stock Final total de N en el Suelo (Kg/ha)	N absorbido o por biomasa- Primer ciclo (kg/ha)	N absorbido por biomasa- Segundo ciclo (kg/ha)	N absorbido por biomasa – Tercer ciclo (kg/ha)	N perdido (Kg/ha)	% N perdido
1	T1	135.24	22.41	61.54	4.52	11.40	35.38	26.16
2	T1	135.24	20.37	39.42	1.73	4.39	69.33	51.26
3	T1	135.24	14.51	13.80	4.97	10.05	91.90	67.95
4	T1	135.24	9.85	24.06	5.80	18.20	77.34	57.19
5	T1	135.24	8.66	10.47	5.02	14.07	97.03	71.75
6	T1	135.24	16.04	79.26	16.89	5.87	70.00	51.76
7	T1	135.24	24.28	8.04	4.75	2.08	96.10	71.05
8	T1	135.24	14.85	60.34	27.23	5.46	27.36	20.23
9	T1	135.24	21.22	12.41	4.55	4.71	92.35	68.29
10	T1	135.24	19.61	20.82	8.20	5.70	80.92	59.83
11	T2	135.24	24.28	19.73	5.07	12.71	73.46	54.31
12	T2	135.24	21.48	73.12	1.40	14.29	24.96	18.45
13	T2	235.24	16.98	53.49	N.E	17.82	146.95	62.47
14	T2	235.24	15.45	38.90	6.39	6.12	168.38	71.58
15	T2	235.24	8.15	18.38	12.96	2.25	193.51	82.26
16	T2	235.24	19.01	33.02	6.78	19.50	156.93	66.71
17	T2	235.24	9.17	16.51	6.13	7.48	195.96	83.30
18	T2	235.24	16.64	89.84	18.56	N.E	110.20	46.84
19	T2	235.24	26.48	30.95	7.36	14.61	155.85	66.25
20	T2	235.24	21.48	N.E	10.01	6.51	197.25	83.85

N°	T	Stock inicial total de N en el Suelo (Kg/ha)	Stock Final total de N en el Suelo (Kg/ha)	N absorbido o por biomasa- Primer ciclo (kg/ha)	N absorbido por biomasa- Segundo ciclo (kg/ha)	N absorbido por biomasa – Tercer ciclo (kg/ha)	N perdido (Kg/ha)	% N perdido
21	T3	235.24	18.33	105.54	N.E	N.E	111.37	47.34
22	T3	235.24	23.77	69.32	15.69	19.60	106.87	45.43
23	T3	235.24	22.07	86.19	13.48	31.59	81.91	34.82
24	T3	N.E	N.E	N.E	N.E	N.E	N.E	N.E
25	T3	235.24	12.31	69.71	14.22	10.60	128.40	54.58
26	T3	235.24	7.13	35.93	9.15	N.E	183.03	77.81
27	T3	235.24	11.20	45.82	14.34	33.53	130.35	55.41
28	T3	235.24	11.88	70.58	19.22	17.61	115.96	49.29
29	T3	235.24	17.83	34.09	22.71	30.45	130.16	55.33
30	T3	235.24	16.81	130.45	24.21	23.39	40.39	17.17
31	T4	235.24	10.70	81.84	14.31	N.E	128.40	54.58
32	T4	235.24	22.92	36.41	7.12	36.82	131.97	56.10
33	T4	235.24	12.73	61.69	8.33	N.E	152.50	64.82
34	T4	235.24	13.75	78.85	11.42	N.E	131.22	55.78
35	T4	235.24	11.88	41.36	4.44	25.03	152.53	64.84
36	T4	235.24	15.79	93.33	22.63	25.82	77.67	33.02
37	T4	235.24	12.73	104.47	12.04	30.63	75.37	32.04
38	T4	N.E	N.E	N.E	N.E	N.E	N.E	N.E
39	T4	235.24	23.77	99.51	29.80	20.18	61.99	26.35
40	T4	235.24	19.52	35.00	36.75	15.37	128.60	54.67
41	T5	235.24	19.86	106.39	17.57	N.E	91.42	38.86
42	T5	N.E	N.E	N.E	N.E	N.E	N.E	N.E

N°	T	Stock inicial total de N en el Suelo (Kg/ha)	Stock Final total de N en el Suelo (Kg/ha)	N absorbido o por biomasa- Primer ciclo (kg/ha)	N absorbido por biomasa- Segundo ciclo (kg/ha)	N absorbido por biomasa – Tercer ciclo (kg/ha)	N perdido (Kg/ha)	% N perdido
43	T5	235.24	15.45	71.62	22.87	21.23	104.08	44.24
44	T5	N.E	N.E	N.E	N.E	N.E	N.E	N.E
45	T5	235.24	14.85	46.15	7.32	15.20	151.73	64.50
46	T5	235.24	16.64	106.79	16.67	30.30	64.84	27.56
47	T5	235.24	15.28	73.40	18.71	16.46	111.39	47.35
48	T5	235.24	9.17	99.66	39.03	33.39	54.00	22.96
49	T5	235.24	17.83	77.21	49.71	22.84	67.66	28.76
50	T5	235.24	16.98	87.33	25.85	40.67	64.42	27.38

*(N.E) Son datos que no existen

Anexo 14. Resultados de sondas PRS: NO₃-N

Parámetro: NO ₃ ⁻ N					
Unidad: µg N/10 cm ² /201 días					
N°	Tratamiento	Bloque	PRS Primer ciclo	PRS Segundo ciclo	PRS Tercer ciclo
1	T1	B1	615.2	241	54.4
2	T1	B2	-	214	139.98
3	T1	B3	-	-	-
4	T1	B4	599	172	87.44
5	T1	B5	521.90	-	98.62
6	T1	B6	398.12	469	373.50
7	T1	B7	634.20	526	125.32
8	T1	B8	-	349	-
9	T1	B9	-	-	-
10	T1	B10	560		
T1			554.70	328	146.54
11	T2	B1	-	-	728.52
12	T2	B2	321	78	-
13	T2	B3	-	-	66.14
14	T2	B4	549.88	322	77.06
15	T2	B5	767.32	192	264.64
16	T2	B6	586.82	309	147.60
17	T2	B7	652.60	463	-
18	T2	B8	330.76	-	-
19	T2	B9	-	-	-

Parámetro: NO ₃ ⁻ N					
Unidad: µg N/10 cm ² /201 días					
N°	Tratamiento	Bloque	PRS Primer ciclo	PRS Segundo ciclo	PRS Tercer ciclo
20	T2	B10	-	390	592.92
T2			534.75	273	256.79
21	T3	B1	-	-	-
22	T3	B2	471.88	276	398.94
23	T3	B3	612.04	259	73.36
24	T3	B4		-	-
25	T3	B5	568.84	-	-
26	T3	B6	716.98	-	-
27	T3	B7	-	208	157.72
28	T3	B8	-	76	187.54
29	T3	B9	108.08	69	182.46
30	T3	B10	315.84	119	163.88
T3			465.61	149.335	193.98
31	T4	B1	513.70	477	-
32	T4	B2	-	-	71
33	T4	B3	559.24	188	567
34	T4	B4	805.90	-	-
35	T4	B5	-	359	266.78
36	T4	B6	-	519	-
37	T4	B7	516.30	-	296.34
38	T4	B8	755.52	-	-
39	T4	B9	397.08	94	175.72
40	T4	B10	-	241	267.64

Parámetro: NO ₃ ⁻ N					
Unidad: µg N/10 cm ² /201 días					
N°	Tratamiento	Bloque	PRS Primer ciclo	PRS Segundo ciclo	PRS Tercer ciclo
T4			591.29	313	215.49
41	T5	B1	682.10	371	-
42	T5	B2	745.66	-	-
43	T5	B3	514.86	363	102.7
44	T5	B4	-	397	413
45	T5	B5	-	187	-
46	T5	B6	-	-	408.30
47	T5	B7	-	-	-
48	T5	B8	163.32	96	90.04
49	T5	B9	85.34	118	191.60
50	T5	B10	297.98	-	143.66
T5			414.87	255	224.947

* (-) Son los datos que no se obtuvieron debido a que no se colocaron PRS en esas repeticiones

Anexo 15. Resultados de sondas PRS: $\text{NH}_4^+\text{-N}$

Parámetro: $\text{NH}_4^+\text{-N}$					
Unidad: $\mu\text{g N}/10\text{ cm}^2/201\text{ días}$					
N°	Tratamiento	Bloque	PRS Primer ciclo	PRS Segundo ciclo	PRS Tercer ciclo
1	T1	B1	0.9	1.3	2.6
2	T1	B2	-	1.1	2.9
3	T1	B3	-	-	-
4	T1	B4	0.6	0.0	3.0
5	T1	B5	0.1	-	2.4
6	T1	B6	0.2	1.0	2.9
7	T1	B7	0.1	0.4	2.7
8	T1	B8	-	0.4	-
9	T1	B9	-	-	-
10	T1	B10	0.8	-	-
T1			0.457	1	2.750
11	T2	B1	-	-	2.4
12	T2	B2	0.4	0.5	-
13	T2	B3	-	-	2.1
14	T2	B4	0.3	0.0	2.4
15	T2	B5	0.4	2.2	3.4
16	T2	B6	0.1	1.3	2.8
17	T2	B7	0.2	2.9	-
18	T2	B8	0.1	-	-
19	T2	B9	-	-	-
20	T2	B10	-	1.5	3.2

Parámetro: $\text{NH}_4^+ \text{N}$					
Unidad: $\mu\text{g N}/10 \text{ cm}^2/201 \text{ días}$					
N°	Tratamiento	Bloque	PRS Primer ciclo	PRS Segundo ciclo	PRS Tercer ciclo
T2			0.240	1	2.707
21	T3	B1	-	-	-
22	T3	B2	0.6	2.6	3.1
23	T3	B3	0.3	0.7	2.8
24	T3	B4	-	-	-
25	T3	B5	0.4	-	-
26	T3	B6	0.4	-	-
27	T3	B7		0.8	2.9
28	T3	B8		0.9	3.3
29	T3	B9	1.3	0.8	2.6
30	T3	B10	1.0	1.6	2.8
T3			0.640	1.233	2.903
31	T4	B1	0.9	0.6	-
32	T4	B2	-	-	2.6
33	T4	B3	0.2	0.5	3.0
34	T4	B4	0.6	-	-
35	T4	B5	-	0.1	2.6
36	T4	B6	-	0.6	-
37	T4	B7	0.2	-	3.6
38	T4	B8	0.1	-	-
39	T4	B9	1.0	0.6	3.7
40	T4	B10		2.4	2.9
T4			0.477	1	3.053

Parámetro: $\text{NH}_4^+ \text{N}$					
Unidad: $\mu\text{g N}/10 \text{ cm}^2/201 \text{ días}$					
N°	Tratamiento	Bloque	PRS Primer ciclo	PRS Segundo ciclo	PRS Tercer ciclo
41	T5	B1	1.4	1.4	-
42	T5	B2	0.5	-	-
43	T5	B3	0.2	0.6	2.6
44	T5	B4	-	0.3	2.9
45	T5	B5	-	0.4	-
46	T5	B6	-	-	2.4
47	T5	B7	-	-	-
48	T5	B8	0.7	1.0	2.8
49	T5	B9	0.2	0.8	2.8
50	T5	B10	0.5	-	3.1
T5			0.570	1	2.757

* (-) Son los datos que no se obtuvieron debido a que no se colocaron PRS en esas repeticiones

Anexo 16. Resultado de análisis de varianza (ANOVA) con los efectos principales de los tratamientos en la producción de biomasa y área foliar específica (SLA) para el primer ciclo del cultivo de *Raphanus sativus* L.

Source	DF	SS	F	P values
Biomasa vegetativa total				
Tratamiento	4	113.85	5.9269	0.0007*
Error	44	211.30		
C.total	48	325.15		
Biomasa del fruto				
Tratamiento	4	19.06	3.7738	0.0101*
Error	44	55.58		
C. Total	48	74.64		
Área foliar específica				
Tratamiento	4	21415.07	2.7847	0.0426*
Error	44	63444.63		
C. Total	48	84859.71		

Anexo 17. Resultado de análisis de varianza (ANOVA) con los efectos principales de los tratamientos en la producción de biomasa y área foliar específica (SLA) para el segundo ciclo del cultivo de *Raphanus sativus* L.

Source	DF	SS	F	P values
Biomasa vegetativa total				
Tratamiento	4	113.49	6.3897	0.0005*
Error	39	173.18		
C. Total	43	286.68		
Biomasa del fruto				
Tratamiento	4	23.62	3.4987	0.0156*
Error	39	65.84		
C. Total	43	89.47		
Área foliar específica				
Tratamiento	4	69317.92	2.2864	0.0809
Error	39	250122.41		
C. Total	43	319440.32		

Anexo 18. Resultado de análisis de varianza (ANOVA) con los efectos principales de los tratamientos en la producción de biomasa y área foliar específica (SLA) para el tercer ciclo del cultivo de *Raphanus sativus* L.

Source	DF	SS	F	P values
Biomasa vegetativa total				
Tratamiento	4	159.15	9.5464	<.0001
Error	33	137.53		
C. Total	37	296.69		
Biomasa del fruto				
Tratamiento	4	82.22	7.4564	0.0002
Error	33	90.978		
C. Total	37	173.205		
Área foliar específica				
Tratamiento	4	86111.77	4.1659	0.0101
Error	34	129189.95		
C. Total	37	215301.72		

Anexo 19. Resultado de análisis de varianza (ANOVA) con los efectos principales de los tratamientos en el suministro de nitrato (NO_3^-) para los tres ciclos del cultivo

Source	DF	SS	F	P values
Primer ciclo del cultivo				
Tratamiento	4	92434	0.6103	0.6592
Error	24	908782.5		
	28	1001216.5		
Segundo ciclo del cultivo				
Tratamiento	4	98480.2	1.2913	0.3002
Error	25	476641		
	28	575121.2		
Tercer ciclo del cultivo				
Tratamiento	4	102530.58	0.8325	0.5173
Error	25	769705.74		
	28	872236.32		

Anexo 20. Resultado de análisis de varianza (ANOVA) con los efectos principales de los tratamientos en el suministro de amonio (NH_4^+) para los tres ciclos del cultivo

Source	DF	SS	F	P values
Primer ciclo del cultivo				
Tratamiento	4	0.59	1.1304	0.3648
Error	25	3.29		
C. Total	29	3.887		
Segundo ciclo del cultivo				
Tratamiento	4	2.42	1.0962	0.3801
Error	25	13.82		
C. Total	29	16.25		
Tercer ciclo del cultivo				
Tratamiento	4	0.51	0.9765	0.438
Error	25	3.29		
C. Total	29	3.81		

Anexo 21. Resultado de análisis de varianza (ANOVA) con los efectos principales de los tratamientos en la absorción de N de la biomasa para el primer ciclo del cultivo de *Raphanus sativus* L.

Source	DF	SS	F	P values
Biomasa vegetativa total				
Tratamiento	4	308834.4	5.6675	0.0009
Error	44	599413.9		
C.Total	48	908248.3		
Biomasa del fruto				
Tratamiento	4	24052.47	4.3328	0.0048
Error	44	61064.31		
C. Total	48	85116.78		
Biomasa de hojas				
Tratamiento	4	162070.5	4.9082	0.0023
Error	44	363224.9		
C. Total	48	525295.4		

Anexo 22. Resultado de análisis de varianza (ANOVA) con los efectos principales de los tratamientos en la absorción de N de la biomasa para el segundo ciclo del cultivo de *Raphanus sativus* L.

Source	DF	SS	F	P values
Biomasa vegetativa total				
Tratamiento	4	230352.13	6.5135	0.0004
Error	39	344811.9		
C. Total	43	575164.03		
Biomasa del fruto				
Tratamiento	4	24731.25	3.0349	0.0285
Error	39	79452.15		
C. Total	43	104183.4		
Biomasa de hojas secas				
Tratamiento	4	105758.87	4.9808	0.0024
Error	39	207024.36		
C. Total	43	312783.24		

Anexo 23. Resultado de análisis de varianza (ANOVA) con los efectos principales de los tratamientos en la absorción de N de la biomasa para el tercer ciclo del cultivo de *Raphanus sativus* L.

Source	DF	SS	F	P values
Biomasa vegetativa total				
Tratamiento	4	214352.12	10.86	<.0001
Error	33	162711.47		
C. Total	37	377063.59		
Biomasa del fruto				
Tratamiento	4	100248	8.33	0.0001
Error	33	96202.46		
C. Total	37	196450.45		
Biomasa de hojas secas				
Tratamiento	4	20251.87	4.80	0.0036
Error	33	34769.50		
C. Total	37	55021.38		

Anexo 24. Resultado de análisis de varianza (ANOVA) con los efectos principales de los tratamientos en la pérdida de N dentro del sistema planta-biochar-suelo al finalizar los tres ciclos del cultivo.

Source	DF	SS	F	P values
Perdida de N				
Tratamiento	4	66372.39	20.73	<.0001
Error	35	28008.69		

Anexo 25. Costo total de la producción de cada tratamiento

Tratamiento	Unidad	kontiki*	Ton**	Insumos kg/(S/.)	Insumos Ton/ (S/.)	Tratamiento ton/ (S/.)	Tratamiento Kg/ (S/.)
Purín de cerdo	kg	-	-	0.6	600	600	0.6
T3							
Purín de cerdo	kg	150	600	0.6	360		
Residuos verdes	kg	150	600	0.4	240	920	0.92
Mano de obra	día	1	4	80	320		
T4							
Purín de cerdo	kg	150	600	0.6	360		
Residuos verdes	kg	150	600	0.4	240		
Ácido fosfórico	L	3	12	5.6	67.2	987.2	0.98
Mano de obra	día	1	4	80	320		
T5							
Purín de cerdo	kg	150	600	0.6	360		
Residuos verdes	kg	150	600	0.4	240		
Ácido fosfórico	L	3	12	5.6	67.2	1152.2	1.15
Urea granulada	kg	6	24	6.9	165		
Mano de obra	día	1	4	80	320		

*Insumos para 1 konitki que produce 250 kg de biochar, **Insumos para producir 4 kontikis que producen 1 ton de biochar.

Anexo 26. Certificados de laboratorio