

**Instituto Tecnológico de Costa Rica  
Universidad Nacional de Costa Rica  
Universidad Estatal a Distancia  
Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo**



**“Biofertilización orgánica de almácigos de café (*Coffea arabica* L.) con compost producido a partir de residuos biomásicos locales, microorganismos de montaña y lodos digeridos de biodigestor en la región de Monteverde, Costa Rica.”**

**Tesis sometida a consideración del tribunal evaluador como requisito para optar al grado de Doctor en Ciencias Naturales para el Desarrollo, con énfasis en Sistemas de Producción Agrícolas.**

**Fabricio Camacho Céspedes**

**Universidad Estatal a Distancia**

**Abril 2019**

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA  
UNIVERSIDAD NACIONAL DE COSTA RICA  
UNIVERSIDAD ESTATAL A DISTANCIA  
DOCTORADO EN CIENCIAS NATURALES PARA EL DESARROLLO**



**“Biofertilización orgánica de almácigos de café (*Coffea arabica* L.) con compost producido a partir de residuos biomásicos locales, microorganismos de montaña y lodos digeridos de biodigestor en la región de Monteverde, Costa Rica.”**



Trabajo de graduación sometido a consideración del tribunal evaluador como requisito para optar al grado de Doctor en Ciencias Naturales para el Desarrollo, con énfasis en Sistemas de Producción Agrícolas.

Estudiante:

Fabricio Camacho Céspedes

Tutor

Quint Newcomer, PhD

Asesores

Karen L. Masters, Ph.D.

Maureen N. Kinyua, Ph.D.

Universidad Estatal a Distancia, Abril 2019

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA  
UNIVERSIDAD NACIONAL DE COSTA RICA  
UNIVERSIDAD ESTATAL A DISTANCIA  
DOCTORADO EN CIENCIAS NATURALES PARA EL DESARROLLO**



**“Biofertilización orgánica de almácigos de café (*Coffea arabica* L.) con compost producido a partir de residuos biomásicos locales, microorganismos de montaña y lodos digeridos de biodigestor en la región de Monteverde, Costa Rica.”**

Trabajo de graduación sometido a consideración del tribunal evaluador como requisito para optar al grado de Doctor en Ciencias Naturales para el Desarrollo, con énfasis en Sistemas de Producción Agrícolas.

**Fabricio Camacho Céspedes**

Sustentante

**TRIBUNAL EXAMINADOR**

Quint Newcomer, Ph.D. \_\_\_\_\_

Director de Tesis

Karen L. Masters, Ph.D. \_\_\_\_\_

Asesora

Maureen N. Kinyua, Ph.D. \_\_\_\_\_

Asesora

Abril 2019

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo a mis abuelos:

Rafael Céspedes Camacho, QEPD

Isabel Camacho Araya, QEPD

Jose Joaquín Camacho Acuña

Odilia Fallas Mora

Ellos me dieron la oportunidad de crecer en los cercos de café en las peñas de la Ese de Pérez Zeledón e inculcaron en mí el amor por ese grandioso cultivo.

También dedico este trabajo a mi hijo Chris, quien es la luz que alimenta mi alma y mi espíritu.

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad de Georgia, Campus Costa Rica, y al Concejo Nacional para Investigaciones Tecnológicas de Costa Rica por el apoyo logístico y económico brindado para la elaboración del presente estudio.

A todas las personas que de una u otra forma han hecho un aporte a este trabajo y en especial a Quint Newcomer, Karen Masters y Maureen Kinyua por servir en mi comité asesor.

A Julio Rodríguez y a todos los compañeros y estudiantes de la Universidad de Georgia que me ayudaron tanto con este proyecto.

A Lidieth Uribe, por abrirme las puertas del Laboratorio de Microbiología Agrícola en la Universidad de Costa Rica.

A Jessica Stubenrauch y a Norman Gentsch por abrirme las puertas para hacer parte de mi pasantía en Alemania.

A todos mis familiares, amigos y seres queridos que me apoyaron incondicionalmente durante este proceso.

Al personal administrativo y a los profesores del DOCINADE y especial a los directores del énfasis en sistemas de producción agrícola por su retroalimentación.

## INDICE DE CONTENIDO

Tribunal Examinador.....	iii
Dedicatoria.....	iv
Agradecimientos .....	v
Indice de figuras .....	x
Indice de cuadros .....	xv
Resumen .....	xvii
Abstract .....	xxi
Capitulo I: Introduccion .....	1
1.1    Antecedentes.....	1
1.1.1 Intensificación sostenible de la agricultura.....	1
1.1.2 Agricultura climáticamente inteligente para la operativizar la sostenibilidad en la agricultura.....	2
1.1.3 Oportunidades de ACI en el Corredor Biológico Pájaro Campana.....	3
1.2 Problema, oportunidad y justificación.....	5
1.2.1 Preámbulo .....	5
1.2.2 Definición y justificación del problema .....	7
1.2.3 Oportunidad.....	8
1.2.4 Propuesta.....	9
1.2.5 Justificación.....	9
1.3 Objetivos.....	16
1.3.1 Objetivo general .....	16
1.3.2 Objetivos específicos.....	16
1.4 Pregunta de investigación.....	16
1.5 Hipótesis.....	17
Capitulo II: Marco conceptual.....	18

2.1 Aprovechamiento de procesos biológicos naturales en la agricultura sostenible	18
2.2 El papel de la materia orgánica en suelo: Compost .....	19
2.3 El papel de la biodiversidad en suelo: Microorganismos de montaña (MM) .....	22
2.4 Lodos digeridos de biodigestor (LDBIO) .....	25
2.5 Requerimientos nutricionales del almácigo de café .....	27
Capítulo III: Materiales y metodos .....	31
3.1 Objetivo específico 1: Diseñar un sistema de biofertilización orgánica con compost producido a partir de residuos biomásicos locales, MM y LDBIO. ....	31
3.2 Objetivo específico 2: Evaluar los parámetros de calidad del compost elaborado. .....	34
3.2.1 Análisis químicos .....	34
3.2.2 Análisis microbiológicos .....	35
3.2.3 Pruebas de inocuidad, estabilidad, madurez.....	35
3.2.4 Fitotoxicidad .....	36
3.3 Objetivo específico 3: Valorar el efecto del compost producido sobre el desarrollo de almácigos de café.....	37
3.3.1 Diseño experimental.....	37
3.3.2 Fases del experimento .....	40
Fase 1: Preparación del área del experimento .....	40
Fase 2: Recolección, secado y germinación de semillas .....	41
Fase 3: Trasplante de plántulas a los bloques de crecimiento.....	41
Fase 4: Monitoreo sobre el desarrollo de las plántulas .....	41
Fase 5: Recolecta y procesamiento de datos .....	42
Fase 6: Análisis estadísticos e interpretación de resultados .....	43
3.3.3 Técnicas e instrumentos .....	46
3.3.4 Definición de variables.....	47

Capítulo IV: Resultados .....	48
4.1 Objetivo específico 1: Diseñar un sistema de biofertilización orgánica con compost producido a partir de residuos biomásicos locales, MM y LDBIO .....	48
4.2 Objetivo específico 2: Evaluar los parámetros de calidad del compost elaborado. ....	50
4.2.1 Caracterización de los MM y LDBIO .....	51
4.2.2 Caracterización de los compost puros .....	52
4.2.3 Evaluación de los niveles de fitotoxicidad .....	53
4.2.3.1 Porcentaje Relativo de Semillas Germinadas (PRSG%).....	53
4.2.3.2 Crecimiento Relativo Radicular (CRR%).....	54
4.2.3.3 Índice de Germinación (IG%).....	56
4.2.3.4 Índice de Crecimiento (IC%) .....	57
4.3 Objetivo específico 3: Valorar el efecto del compost producido sobre el desarrollo de almácigos de café.....	59
4.3.1 Peso seco total, radicular, leñoso y foliar .....	60
4.3.2 Estado fitosanitario .....	79
4.3.3 Análisis de costos de producción y relación costo/beneficio .....	82
Capítulo V: Discusión .....	86
5.1 Objetivo específico 1: Diseñar un sistema de biofertilización orgánica con compost producido a partir de residuos biomásicos locales, MM y LDBIO .....	86
5.2 Objetivo específico 2: Evaluar los parámetros de calidad del compost elaborado. ....	87
5.2.1 Agentes optimizadores de compost .....	87
5.2.2 Prefactibilidad en el empleo de MM y LDBIO como agentes optimizadores del compost.....	88
5.2.3 Combinación de agentes optimizadores para el mejoramiento de la calidad del compost.....	89

5.2.4 Macronutrientes .....	90
5.2.5 Micronutrientes .....	91
5.2.6 Características físicas y microbiológicas.....	92
5.2.7 Otros parámetros de calidad del compost.....	93
5.2.8 Fitotoxicidad .....	95
5.3 Objetivo específico 3: Valorar el efecto del compost producido sobre el desarrollo de almácigos de café.....	98
5.3.1 Peso seco total, radicular, leñoso y foliar.....	100
5.3.2 Estado fitosanitario .....	109
5.3.3 Análisis de costos de producción y relación costo/beneficio .....	110
5.3.4 Evolución hacia un nuevo paradigma de sostenibilidad agroecosistémica.....	119
Capítulo VI: Conclusiones y recomendaciones .....	121
6.1.1 Conclusiones .....	121
6.1.2 Recomendaciones .....	123
Capítulo VII: Bibliografía consultada .....	125
Capítulo VIII: Anexos .....	144
Anexo 1. Mapa de uso actual del suelo en el CBPC. (Chinchilla Ramos, 2015). ....	144
Anexo 2. Divergencia de uso del suelo con respecto a su capacidad de uso. (Chinchilla Ramos, 2015).....	145
Anexo 3. Comprobación gráfica de supuestos para el ANOVA de 1 vía para la variable peso seco por tratamiento. R Core Team (2018).....	146
Anexo 4. Comprobación gráfica de supuestos para el ANOVA de 1 vía para la variable peso seco radicular por tratamiento. R Core Team (2018). ....	147
Anexo 5. Comprobación gráfica de supuestos para el ANOVA de 1 vía para la variable peso seco del tallo y las ramitas por tratamiento. R Core Team (2018).....	148

Anexo 6. Comprobación gráfica de supuestos para el ANOVA de 1 vía para la variable peso seco foliar por tratamiento. R Core Team (2018). .....	149
--	-----

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Distribución de los bloques completamente aleatorizados para el ensayo de crecimiento de almácigo de café sometidos a diferentes sistemas de fertilización con compost según metodología de FAO (1999). .....	40
Figura 2. Variación de la temperatura en grados centígrados (°C) de las pilas de compost. 2016-2017. Morado (compost puro), azul (compost con MMR), amarillo (compost con MMP), celeste (compost con LDBIO), magenta (compost con MMR y LDBIO A), café (compost con MMR y LDBIO B). .....	48
Figura 3. Variación de la saturación de oxígeno (%) de las pilas de compost. 2016-2017. Morado (compost puro), azul (compost con MMR), amarillo (compost con MMP), celeste (compost con LDBIO), magenta (compost con MMR y LDBIO A), café (compost con MMR y LDBIO B). .....	49
Figura 4. Variación en el pH de las pilas de compost. 2016-2017. Morado (compost puro), azul (compost con MMR), amarillo (compost con MMP), celeste (compost con LDBIO), magenta (compost con MMR y LDBIO A), café (compost con MMR y LDBIO B). .....	49
Figura 5. Variación del contenido de agua (m <sup>3</sup> / m <sup>3</sup> ) de las pilas de compost. 2016-2017. Morado (compost puro), azul (compost con MMR), amarillo (compost con MMP), celeste (compost con LDBIO), magenta (compost con MMR y LDBIO A), café (compost con MMR y LDBIO B). .....	50
Figura 6. Variación de la conductividad eléctrica (dS/m) de las pilas de compost. 2016-2017. Morado (compost puro), azul (compost con MMR), amarillo (compost con MMP), celeste (compost con LDBIO), magenta (compost con MMR y LDBIO A), café (compost con MMR y LDBIO B). .....	50
Figura 7. Porcentaje Relativo de Semillas Germinadas (PRSG%) de pepino ( <i>Cucumis sativus</i> L.) expuestas a T1 compost puro, T2 compost con MMR, T3 compost con	

MMP, T4 compost con LDBIO, T5 compost con MMR y LDBIO A, T6 compost con MMR y LDBIO B. 2017. Las cajas representan el agrupamiento del 50% de los datos (segundo y tercer cuartil) y la línea interna, la mediana. La numeración en rojo muestra el PRSG % promedio para cada tratamiento. Las líneas horizontales indican el valor de p obtenido del test de Wilcoxon entre el tratamiento señalado y el control. Existen diferencias significativas entre el T5 y T6 con respecto al control ( $p < 0.05$ ). El empleo integrado de MM+LDBIO podría tener un efecto fitotóxico sobre cultivos sensibles. .... 55

Figura 8. Crecimiento Relativo Radicular (CRR%) de semillas de pepino (*Cucumis sativus* L.) expuestas a T1 compost puro, T2 compost con MMR, T3 compost con MMP, T4 compost con LDBIO, T5 compost con MMR y LDBIO A, T6 compost con MMR y LDBIO B. 2017. Las cajas representan el agrupamiento del 50% de los datos (segundo y tercer cuartil) y la línea interna, la mediana. La numeración en rojo muestra el CRR % promedio para cada tratamiento. Las líneas horizontales indican el valor de p obtenido del test de Wilcoxon entre el tratamiento señalado y el control. Existen diferencias significativas entre el T2, T5 y T6 con respecto al control ( $p < 0.05$ ). .... 56

Figura 9. Índice de Germinación (IG%) de semillas de pepino (*Cucumis sativus* L.) expuestas a T1 compost puro, T2 compost con MMR, T3 compost con MMP, T4 compost con LDBIO, T5 compost con MMR y LDBIO A, T6 compost con MMR y LDBIO B. 2017. Las cajas representan el agrupamiento del 50% de los datos (segundo y tercer cuartil) y la línea interna, la mediana. La numeración en rojo muestra el IG % promedio para cada tratamiento. Las líneas horizontales indican el valor de p obtenido del test de Wilcoxon entre el tratamiento señalado y el control. Existen diferencias significativas entre el T5 y T6 con respecto al control ( $p < 0.05$ ). El empleo integrado de MM+LDBIO podría tener un efecto fitotóxico sobre cultivos sensibles. .... 58

Figura 10. Índice de Crecimiento (IC%) de semillas de pepino (*Cucumis sativus* L.) expuestas a T1 compost puro, T2 compost con MMR, T3 compost con MMP, T4 compost con LDBIO, T5 compost con MMR y LDBIO A, T6 compost con MMR y LDBIO B. 2017. Las cajas representan el agrupamiento del 50% de los datos

(segundo y tercer cuartil) y la línea interna, la mediana. La numeración en rojo muestra el IC % promedio para cada tratamiento. Las líneas horizontales indican el valor de p obtenido del test de Wilcoxon entre el tratamiento señalado y el control. Existen diferencias significativas entre el T5 y T6 con respecto al control ( $p < 0.05$ ). El empleo integrado de MM+LDBIO podría tener un efecto fitotóxico sobre cultivos sensibles. .... 59

Figura 11. Peso seco promedio de las plántulas de café expuestas a los diferentes tipos de compost experimentales y controles. T1 suelo sin fertilizante, T2 humus de lombriz y NPK, T3 compost puro, T4 compost con MMR, T5 compost con MMP, T6 compost con LDBIO, T7 compost con MMR y LDBIO A y T8 compost con MMR y LDBIO B. 2018. Las cajas representan el agrupamiento del 50% de los datos (segundo y tercer cuartil) y la línea interna, la mediana. La numeración en rojo muestra el peso seco promedio obtenido en cada tratamiento. Existen diferencias significativas entre los tratamientos ( $p < 0.05$ )..... 61

Figura 12. Peso seco radicular promedio de las plántulas de café expuestas a los diferentes tipos de compost experimentales y controles. T1 suelo sin fertilizante, T2 humus de lombriz y NPK, T3 compost puro, T4 compost con MMR, T5 compost con MMP, T6 compost con LDBIO, T7 compost con MMR y LDBIO A y T8 compost con MMR y LDBIO B. 2018. Las cajas representan el agrupamiento del 50% de los datos (segundo y tercer cuartil) y la línea interna, la mediana. La numeración en rojo muestra el peso seco promedio obtenido en cada tratamiento. Existen diferencias significativas entre los tratamientos ( $p < 0.05$ )..... 63

Figura 13. Peso seco promedio del tallo y ramitas de las plántulas de café expuestas a los diferentes tipos de compost experimentales y controles. T1 suelo sin fertilizante, T2 humus de lombriz y NPK, T3 compost puro, T4 compost con MMR, T5 compost con MMP, T6 compost con LDBIO, T7 compost con MMR y LDBIO A y T8 compost con MMR y LDBIO B. 2018. Las cajas representan el agrupamiento del 50% de los datos (segundo y tercer cuartil) y la línea interna, la mediana. La numeración en rojo muestra el peso seco promedio obtenido en cada tratamiento. Existen diferencias significativas entre los tratamientos ( $p < 0.05$ )..... 64

Figura 14. Peso seco foliar promedio de las plántulas de café expuestas a los diferentes tipos de compost experimentales y controles. T1 suelo sin fertilizante, T2 humus de lombriz y NPK, T3 compost puro, T4 compost con MMR, T5 compost con MMP, T6 compost con LDBIO, T7 compost con MMR y LDBIO A y T8 compost con MMR y LDBIO B. 2018. Las cajas representan el agrupamiento del 50% de los datos (segundo y tercer cuartil) y la línea interna, la mediana. La numeración en rojo muestra el peso seco promedio obtenido en cada tratamiento. Existen diferencias significativas entre los tratamientos ( $p < 0.05$ )..... 65

Figura 15. Concentración de nitrógeno en los tejidos foliares. T1 suelo sin fertilizante, T2 humus de lombriz y NPK, T3 compost puro, T4 compost con MMR, T5 compost con MMP, T6 compost con LDBIO, T7 compost con MMR y LDBIO A y T8 compost con MMR y LDBIO B. 2018. Las cajas representan el agrupamiento del 50% de los datos (segundo y tercer cuartil) y la línea interna, la mediana. La numeración en rojo muestra el promedio obtenido en cada tratamiento. .... 76

Figura 16. Concentración de fósforo en los tejidos foliares. T1 suelo sin fertilizante, T2 humus de lombriz y NPK, T3 compost puro, T4 compost con MMR, T5 compost con MMP, T6 compost con LDBIO, T7 compost con MMR y LDBIO A y T8 compost con MMR y LDBIO B. 2018. Las cajas representan el agrupamiento del 50% de los datos (segundo y tercer cuartil) y la línea interna, la mediana. La numeración en rojo muestra el promedio obtenido en cada tratamiento. .... 77

Figura 17. Concentración de potasio en los tejidos foliares. T1 suelo sin fertilizante, T2 humus de lombriz y NPK, T3 compost puro, T4 compost con MMR, T5 compost con MMP, T6 compost con LDBIO, T7 compost con MMR y LDBIO A y T8 compost con MMR y LDBIO B. 2018. Las cajas representan el agrupamiento del 50% de los datos (segundo y tercer cuartil) y la línea interna, la mediana. La numeración en rojo muestra el promedio obtenido en cada tratamiento. .... 78

Figura 18. Concentración de azufre en los tejidos foliares. T1 suelo sin fertilizante, T2 humus de lombriz y NPK, T3 compost puro, T4 compost con MMR, T5 compost con MMP, T6 compost con LDBIO, T7 compost con MMR y LDBIO A y T8 compost con MMR y LDBIO B. 2018. Las cajas representan el agrupamiento del 50% de los datos

(segundo y tercer cuartil) y la línea interna, la mediana. La numeración en rojo muestra el promedio obtenido en cada tratamiento. ....	79
Figura 19. Estado fitosanitario de almácigo de café por tratamiento. T1 suelo sin fertilizante, T2 humus de lombriz y NPK, T3 compost puro, T4 compost con MMR, T5 compost con MMP, T6 compost con LDBIO, T7 compost con MMR y LDBIO A y T8 compost con MMR y LDBIO B. 2018. Las cajas representan el agrupamiento del 50% de los datos (segundo y tercer cuartil) y la línea interna, la mediana.....	81
Figura 20. Efecto de la fertilización de almácigo de café con compost. Las plántulas de la izquierda fueron fertilizadas, mientras que las de la derecha no recibieron ningún tipo de fertilizante. 2018. ....	101
Figura 21. Numero de hojas por tratamiento. T1 suelo sin fertilizante, T2 humus de lombriz y NPK, T3 compost puro, T4 compost con MMR, T5 compost con MMP, T6 compost con LDBIO, T7 compost con MMR y LDBIO A y T8 compost con MMR y LDBIO B. 2018. Las cajas representan el agrupamiento del 50% de los datos (segundo y tercer cuartil) y la línea interna, la mediana. ....	102
Figura 22. Desarrollo de las diferentes partes de las plántulas de café según cada tratamiento. T1 suelo sin fertilizante, T2 humus de lombriz y NPK, T3 compost puro, T4 compost con MMR, T5 compost con MMP, T6 compost con LDBIO, T7 compost con MMR y LDBIO A y T8 compost con MMR y LDBIO B. 2018. ....	103
Figura 23. Diferencias sobre el estado fitosanitario de plantas biofertilizadas con compost (superior) y sin compost (inferior). 2018. ....	109
Figura 24. Costos de producción por unidad de crecimiento. T1 suelo sin fertilizante, T2 humus de lombriz y NPK, T3 compost puro, T4 compost con MMR, T5 compost con MMP, T6 compost con LDBIO, T7 compost con MMR y LDBIO A y T8 compost con MMR y LDBIO B. 2018. ....	113
Figura 25. Relaciones costo beneficio a dos diferentes precios potenciales de venta del almácigo. T1 suelo sin fertilizante, T2 humus de lombriz y NPK, T3 compost puro, T4 compost con MMR, T5 compost con MMP, T6 compost con LDBIO, T7 compost con MMR y LDBIO A y T8 compost con MMR y LDBIO B. 2018. ....	113

## INDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Composición de los compost elaborados para desarrollar un sistema de biofertilización orgánica para almácigo de café en el distrito de Monteverde, Puntarenas, Costa Rica. Monteverde, Costa Rica. 2016-2017.....	32
Cuadro 2. Composición de los tratamientos elaborados para evaluar la fitotoxicidad del compost. Monteverde, Costa Rica. 2016-2017.....	36
Cuadro 3. Tratamientos para comprobar el efecto del compost sobre el desarrollo de almácigo de café. Monteverde, Costa Rica. 2017-2018.....	39
Cuadro 4. Técnicas e instrumentos de investigación para el ensayo de crecimiento de almácigo de café sometidos a diferentes sistemas de fertilización con compost. Monteverde, Costa Rica. 2017-2018. ....	46
Cuadro 5. Caracterización química y microbiológica de una muestra homogenizada de MM Y LDBIO. Monteverde, Costa Rica. 2017. ....	51
Cuadro 6. Caracterización química y microbiológica de una muestra homogenizada de los compost elaborados con MM y LDBIO. Monteverde, Costa Rica. 2017. ....	52
Cuadro 7. Promedios de los diferentes índices y estadísticos calculados para evaluar la fitotoxicidad del MM y LDBIO. Monteverde, Costa Rica. 2017. n=6 por tratamiento. ....	54
Cuadro 8. Peso seco promedio (g) de las plántulas de café expuestas a los diferentes tipos de compost experimentales y controles. Monteverde, Costa Rica. 2018.....	60
Cuadro 9. Peso seco promedio radicular, leñoso y foliar (g) de las plántulas de café expuestas a los diferentes tipos de compost experimentales y controles. Monteverde, Costa Rica. 2018.....	62
Cuadro 10. Comparación del peso seco promedio (g) de las plántulas de café entre el testigo (T1, suelo sin fertilizante) y los diferentes tipos de compost. Monteverde, Costa Rica. 2018.....	66
Cuadro 11. Comparación del peso seco promedio (g) de las plántulas de café entre el tratamiento más intensivo (T2, vermicompost+NPK) y los diferentes tipos de compost. Monteverde, Costa Rica. 2018.....	68

Cuadro 12. Comparación del peso seco promedio (g) de las plántulas de café entre el compost puro (T3, sin enmendar) y los compost enmendados. Monteverde, Costa Rica. 2018. ....	70
Cuadro 13. Caracterización química y microbiológica de una muestra de las mezclas de suelo y compost (33%/67%). Monteverde, Costa Rica. 2017. ....	72
Cuadro 14. Estado fitosanitario del almácigo de café por tratamiento. Monteverde, Costa Rica. 2018. ....	80
Cuadro 15. Razón de propensión (OR) de los tratamientos experimentales con respecto al tratamiento T2 a generar plántulas con estado fitosanitario deficiente >3. Monteverde, Costa Rica. 2018. ....	82
Cuadro 16. Análisis de costos de producción de los diferentes tratamientos. CR¢. Monteverde, Costa Rica. 2018. ....	83

## RESUMEN

El presente trabajo aporta evidencia empírica sobre el rendimiento y calidad de un nuevo sistema de fertilización para la producción de almácigo de café orgánico que utiliza compost elaborado con residuos biomásicos locales, microorganismos de montaña (MM) y lodos digeridos de biodigestor (LDBIO). El sistema ofrece una solución confiable al problema de escasez de alternativas de fertilización efectivas y validadas científicamente para la producción de almácigo de alta calidad en la región cafetalera de Monteverde, Puntarenas, Costa Rica (600-1500 m.s.n.m).



El autor, Fabricio Camacho, con su almácigo de café producido experimentalmente con el nuevo sistema de fertilización. Foto por Gray Simpson. Diciembre 2017.

El nuevo sistema de fertilización produjo plántulas con un excelente nivel de desarrollo y calidad fitosanitaria, y presentó costos de producción menores a los del sistema de fertilización convencional intensivo que utilizan los cafetaleros de la región, debido a que se fundamenta en el empleo de residuos disponibles localmente, lo cual promueve un mejor manejo de los desechos en las fincas y facilita la recuperación de nutrientes escasos como el fósforo.

El nuevo sistema se alinea armoniosamente con los objetivos de sostenibilidad de los productores locales, permitiéndoles tener acceso a opciones de certificación de sus cafetales desde la etapa del vivero. El sistema es congruente con los principios de la agricultura climáticamente inteligente ya que aprovecha las sinergias y beneficios que ofrece la integración de la tecnología del compostaje, el cultivo de microorganismos nativos del bosque y el aprovechamiento de los biosólidos derivados de la descontaminación anaeróbica de aguas residuales, para producir un compost de mayor calidad que ayuda a recuperar y mantener las características de fertilidad y biodiversidad del suelo, lo cual extiende el alcance del paradigma de producción sostenible en la región de Monteverde y mejora las oportunidades para intensificar sosteniblemente la productividad económica y la capacidad adaptativa de los sistemas de producción cafetaleros a los efectos de la variabilidad climática y el deterioro ambiental.

La viabilidad técnica del nuevo biofertilizante está dada desde el punto de vista de la validez del diseño y el método de preparación del compost, la calidad del producto terminado y el rendimiento que ofrece sobre el crecimiento del almacigo. Desde el punto de vista de validez del diseño y la técnica de preparación, el sistema de fertilización propuesto cumplió satisfactoriamente con todos los parámetros teóricos del proceso de compostaje, incluyendo las tres etapas térmicas que aseguran la estabilidad y madurez del material terminado (mesófila uno y dos, y termófila). El tiempo de estabilización y maduración de la biomasa se mantuvo dentro del rango óptimo en menos de 150 días, y la incorporación de los microorganismos y los lodos no afectó el pH, la conductividad eléctrica, la saturación de oxígeno ni el contenido de agua durante el proceso de transformación de la materia orgánica, lo cual indica que el diseño y el método preparación fue adecuado.

Desde el punto de vista de calidad, el sistema de fertilización propuesto logró alcanzar niveles adecuados de estabilidad, madurez, inocuidad, pH y conductividad eléctrica, lo cual indica que el compost producido es de óptima calidad. Estos parámetros no fueron afectados por la incorporación de microorganismos y lodos en el material compostable. Por el contrario, la integración de ambos compuestos en la mezcla produjo una mejora en la concentración de macronutrientes, así como en el contenido de materia orgánica, carbono, humedad y biomasa microbiana con respecto al compost convencional. Se determinó que el empleo combinado de ambos insumos puede provocar fitotoxicidad en cultivos herbáceos, como las cucurbitáceas, por lo que es necesario desarrollar investigaciones más específicas dirigidas a explicar las razones y el alcance de la fitotoxicidad observada.

La incorporación de compost en el suelo como fertilizante optimizó los principales parámetros de fertilidad del sustrato de crecimiento incluyendo el pH, la suma de bases intercambiables, la capacidad de intercambio catiónico efectiva, el contenido de fósforo y la concentración de biomasa microbiana. También aumentó el contenido de Zn y Fe y elevó levemente la salinidad del suelo, lo cual puede tener un efecto negativo sobre el adecuado crecimiento del cultivo que necesita ser investigado a posteriori.

Desde el punto de vista de rendimiento sobre el crecimiento del almacigo, el sistema de fertilización propuesto produjo plántulas que alcanzaron un desarrollo de más de un 200% del peso seco en comparación con las que no recibieron ningún tipo de fertilización, lo cual indica que el compost producido tiene un efecto positivo sobre el crecimiento de este cultivo. El nivel de desarrollo y el estado fitosanitario alcanzado fue equivalente al de las plántulas expuestas al sistema de fertilización convencional intensivo que utilizan los productores locales, el cual emplea una mezcla de suelo, vermicompost y abono sintético NPK (10:30:10) en el sustrato de crecimiento. El costo de producción por plántula y la relación costo beneficio bajo el sistema propuesto fueron un 10% menor al del sistema convencional intensivo. La diferencia en el costo de producción unitario representa un ahorro en el establecimiento de nuevas plantaciones de café de  $\phi$ 150,800 colones por hectárea, y de  $\phi$ 450,000 en fincas de 3 ha representativas de la región de

Monteverde, ahorro que equivale a un 40% de los ingresos del primer año de cosecha para una finca orgánica de ese tamaño.

Aunque los resultados específicos del estudio están contextualizados a las condiciones agroecológicas de la región de Monteverde, se considera que siempre y cuando se respeten las técnicas de producción empleadas, es probable que se puedan obtener resultados congruentes de desarrollo y calidad del almacigo de café en otras regiones cafetaleras con condiciones similares.

## ABSTRACT

This study provides empirical evidence of the quality and yield of a new fertilization system for organic coffee seedling production using compost manufactured from plant residuals, local forest soil microorganisms and biodigester sludge. This system offers a reliable solution to the shortage of effective and scientifically validated fertilization alternatives to produce high quality coffee seedlings in the coffee-growing region of Monteverde, Puntarenas, Costa Rica (600 to 1500 m.a.s.l).



The author, Fabricio Camacho, in his experimental nursery. Photo by Gray Simpson.  
December 2017.

The new fertilization system produced coffee seedlings with excellent development and phytosanitary condition. The new system also had lower production costs than the most intensive conventional fertilization system used by local coffee producers, primarily because the experimental system uses locally available farm residuals, which promotes better waste management practices and facilitates the recovery of scarce nutrients like phosphorous.

The new system is aligned with the sustainability objectives of Monteverde's coffee farmers and allows them to certify their plantations from the nursery stage. The system is also aligned with climate smart agriculture principles as it harnesses the synergies and benefits of the integration of compost technology, effective local soil microorganisms cultures, and the recovery of biosolids produced during anaerobic digestion. This system results in the production of high quality compost and is an efficient mechanism to recover and sustain soil fertility and enhance soil biodiversity. This in turn extends the reach of the sustainable production paradigm in Monteverde and improves the opportunities to sustainably intensify economic productivity and the adaptive capacity of the coffee agroecosystems to the effects of climatic variability and environmental degradation.

The technical viability of the new biofertilizer is demonstrated from the perspective of appropriate compost design and preparation technique, compost quality and the effect on seedling development. From the design and preparation appropriateness perspective, the compost produced met all the parameters of the composting process, including the three thermal stages required to achieve stability and maturity of the finished compost. The stabilization and maturation time stayed within the optimal range below 150 days and the addition of microorganisms and sludge did not affect the compost pH, electrical conductivity, oxygen saturation or water content during the transformation of the organic matter, which indicates appropriate design and preparation technique.

From the compost quality perspective, the new compost reached adequate levels of stability, maturity, microbiological harmlessness, pH and electrical conductivity, which indicates optimal compost quality. These parameters were not affected by the addition of microorganisms and biosolids. Instead, they led into an improvement in macronutrient, organic matter, carbon, water and microbial biomass contents with respect to the

conventional compost. The integration of these materials did show phytotoxicity in sensitive herbaceous crops (such as cucumbers), which requires further investigation.

Incorporation of the experimental compost into the soil as a fertilizer optimized the soil's fertility parameters including the pH, the sum of exchangeable bases, the effective cation exchange capacity, the phosphorous content and the concentration of microbial biomass. Fe and Zn content and the soil salinity level also increased as a result of the addition of the experimental compost into the soil, which may produce negative effects in crop development. This is another finding which requires further investigation.

Regarding coffee seedling development, the new compost produced seedlings that were 200% larger in dry weight than the plants produced without compost or fertilizer, which indicates that the experimental compost has a positive effect on seedling growth. The growth and phytosanitary condition of the seedlings fertilized with the experimental compost were equivalent to the levels reached by plants fertilized with the conventional intensive system, which used a mix of soil with vermicompost and NPK (10:30:10). The seedling production costs and the cost benefit ratio under the new fertilization system were 10% lower than in the conventional intensive system. The production cost difference translates into savings of ₱150,800 per hectare in the establishment of new coffee plantations, and ₱450,000 in 3 hectare farms, which is the typical size of a small scale coffee farm in in Monteverde. These savings represent 40% of the total income that a small farmer would expect to generate during the first production year of a new coffee plantation.

Although the specific results of this study are contextualized to the agroecological conditions of the Monteverde region, it is hypothesized that as long as the production techniques are followed correctly, this new system would produce similar seedling development and quality in other coffee-growing regions with similar conditions to Monteverde.

## CAPITULO I: INTRODUCCION

### 1.1 ANTECEDENTES

#### 1.1.1 Intensificación sostenible de la agricultura

La intensificación que ha experimentado la agricultura en los últimos 100 años, ha provocado serios impactos tanto ambientales como socioeconómicos en el planeta (Foley *et al.*, 2011; Kremen, Iles, *et al.*, 2012; FAO, 2014; Clark & Tilman, 2017). Estos impactos incluyen el deterioro de hábitats naturales esenciales en el aprovisionamiento de servicios ecosistémicos, pérdidas en la biodiversidad principalmente a través de la deforestación para la expansión de la frontera agrícola, liberación de emisiones de gases de efecto invernadero que provocan hasta un 24% de las emisiones totales, cambios en las condiciones del suelo debido a su explotación irracional, deterioro del recurso hídrico, aumento en el uso de energía y combustibles fósiles, expansión de la contaminación, así como la liberación de toxinas en las cadenas alimenticias y la propagación de problemas de salud pública a través de la exposición a pestes y a pesticidas químicos (Horrigan *et al.*, 2002; Tilman *et al.*, 2002; Lal, 2004; Foley *et al.*, 2005; Foley *et al.*, 2011; Lynch *et al.*, 2011; Kremen, Iles, *et al.*, 2012; IPCC, 2014; Kovács-Hostyánszki *et al.*, 2017).

El sistema global de alimentación se está dirigiendo hacia una confluencia de presiones sin precedentes en los próximos 40 años (Foresight, 2011). Esas presiones consisten principalmente en el aumento de la población y el consecuente incremento en la demanda de alimentos, donde se estima que habrá un incremento del 60% de la demanda a nivel global y un aumento del 100% en países subdesarrollados a partir de las cifras de consumo actual (FAO, 2016). El cambio climático, la variación en la disponibilidad de área e insumos para la producción (agua, nutrientes, suelo, petróleo) y la volatilidad de los precios de los productos, son otros factores que aumentan el nivel de complejidad al reto de alcanzar la seguridad alimentaria (Foley *et al.*, 2011; Kremen, Iles, *et al.*, 2012; FAO, 2014).

Si la trayectoria actual de la agricultura se mantiene, se estará exacerbando los problemas y retos citados mientras que al mismo tiempo se estará comprometiendo la capacidad de producir tanto los alimentos, como los servicios ecosistémicos y beneficios económicos necesarios para mantener la seguridad alimentaria en el planeta (Cribb, 2010; FAO, 2014). Para enfrentar el reto de lograr la seguridad alimentaria, mientras se reducen los impactos sociales y ambientales de la agricultura, se promueve la mitigación y adaptación al cambio climático, se mejora el rendimiento económico, todo bajo un clima cambiante y una población creciente, en un planeta cuya capacidad de carga está ya sobrepasada, es necesario y urgente promover una transición efectiva hacia un modelo de agricultura sostenible en forma expedita y estratégica (NRC, 1993; FAO, 2013a, 2014; IPCC, 2014) y así evitar que los problemas se tornen irreversibles o más complejos, lo cual puede lograrse a través de un proceso de transformación del sector agropecuario al que se le denomina como la intensificación sostenible de la agricultura (FAO, 2016).

#### 1.1.2 Agricultura climáticamente inteligente para la operativizar la sostenibilidad en la agricultura.

La agricultura climáticamente inteligente (ACI) es un enfoque que aprovecha los recursos y la tecnología disponibles para fomentar un proceso de intensificación sostenible de la agricultura, a través del fortalecimiento de las sinergias e intercambios entre los elementos que conforman los sistemas de producción para optimizar la seguridad alimentaria, mientras que se reducen las emisiones de gases de efecto invernadero y se incrementa la capacidad de adaptación y resiliencia de los agroecosistemas al cambio climático (FAO, 2013a).

Existen una serie de estrategias de manejo de los sistemas de producción que pueden generar simultáneamente beneficios de adaptación y mitigación tanto a nivel de unidades de producción como de finca (Harvey *et al.*, 2014). Muchas de estas estrategias pueden proporcionar seguridad alimentaria, beneficios económicos y al mismo tiempo brindar una serie de servicios ecosistémicos a la sociedad (Kremen & Miles, 2012). Por ejemplo, la incorporación de residuos de cosecha al suelo, el uso de abonos orgánicos, y la

mínima mecanización, puede aumentar la cantidad de carbono en el suelo, mejorar la humedad y reducir la erosión durante fenómenos climáticos extremos (Hobbs, 2007; Delgado *et al.*, 2011).

La mayoría de estas y muchas otras prácticas son ya bien conocidas y empleadas bajo los conceptos de Agricultura Conservacionista, Agroforestería (Sistemas Agroforestales), Ecoagricultura, Mejores Prácticas Agrícolas, entre otras. Sin embargo, una aplicación más amplia es necesaria (Harvey *et al.*, 2014) tanto a nivel puntual como de paisaje, debido que el alcance de este paradigma de producción ha sido limitado por varias razones, siendo las principales la falta de inversión en investigación y desarrollo en el afinamiento y el traslado de las técnicas más efectivas hacia los productores (Tsvetkov *et al.*, 2018), y por el inadecuado sistema de valoración que no toma en cuenta los beneficios ambientales que se derivan de la agricultura sostenible, lo cual crea una imagen incompleta y le asigna un estigma de baja rentabilidad.

La efectividad del cabildeo político que hacen las empresas adaptadas al modelo de agricultura convencional para mantener su estructura y filosofía de trabajo a pesar de las externalidades sociales y ambientales que se derivan a partir de ese paradigma de producción, es otra causa importante de la prevalencia del paradigma convencional, así como la existencia de un vacío de información en cuanto al efecto de la implementación integrada de diferentes técnicas (FAO, 2013a) que amplifiquen la efectividad en condiciones específicas (FAO, 2014), en vista de que la mayoría de las decisiones sobre la implementación de nuevas tecnologías agrícolas sostenibles tendrán lugar a nivel finca y paisaje (Wheeler & von Braun, 2013).

### 1.1.3 Oportunidades de ACI en el Corredor Biológico Pájaro Campana

El Corredor Biológico Pájaro Campana (CBPC) es un territorio de 66,496 hectáreas ubicado al noroeste de Costa Rica donde habita una población de 16,293 personas (Chinchilla Ramos, 2015). Desde el año 2007 en este territorio se promueve un proceso que aglutina a diversos actores que impulsan acciones para la protección de la

biodiversidad, la conectividad entre los ecosistemas, el uso racional de los recursos naturales y el desarrollo solidario y equitativo de las comunidades (Concejo Local CBPC, 2011).

Un 52% del territorio del CBPC es utilizado para actividades agrícolas, dentro de los que se incluyen terrenos con pastos para la ganadería de carne y leche (43%), así como áreas para el cultivo de caña de azúcar (7%) y piña (2%, ver Anexo 1) (Chinchilla Ramos, 2015). Aunque la mayoría de las actividades agropecuarias se ubican en terrenos de aptitud agrícola, existe una divergencia de uso en un área que representa 8,527 hectáreas (13% del territorio), las cuales están siendo sobreutilizadas ya que a pesar de que son de aptitud forestal por estar ubicadas en la parte media y alta del CBPC donde la pendiente es pronunciada, fueron deforestadas para la colocación de pastos para el desarrollo de ganadería extensiva (ver Anexo 2), los cuales muestran fuertes señales de erosión y desgaste, así como pérdida de productividad.

El aumento en la variabilidad climática en el CBPC puede llegar a tener serias consecuencias negativas en los patrones de producción de la agricultura a nivel local, debido al riesgo de estrés hídrico y al aumento de temperatura proyectada para la zona donde se ubica el corredor (MINAE & IMN, 2008, 2014; Stuckey *et al.*, 2014) por lo que resulta imperativo desarrollar mecanismos de adaptación tendientes a mantener o mejorar sosteniblemente la capacidad productiva de los cultivos ante el nuevo escenario climático (CEPAL, 2010; Stuckey *et al.*, 2014), así como a recuperar la integridad ecológica del paisaje y de los terrenos degradados.

Los sistemas agroforestales son arreglos espaciales de árboles y cultivos distribuidos en un terreno específico intencionalmente para maximizar la producción y recuperar o mantener la integridad ecológica del agroecosistema (ONF, 2013). El éxito de su funcionamiento se basa en la optimización de las sinergias e intercambios que se desarrollan a partir de las interacciones entre los elementos bióticos y abióticos que lo conforman (Harvey *et al.*, 2014), donde la biodiversidad tiene un papel fundamental como agente regulador de las funciones que promueven el equilibrio dinámico del sistema como lo es la mineralización de la materia orgánica, el control biológico, el ciclaje y la fijación de elementos vitales como el C y N y el aprovisionamiento de otros servicios

ecosistémicos de gran importancia para el mantenimiento natural de la productividad como la aireación del suelo, el aporte de materia orgánica y la polinización (Perfecto et al., 1996; Florez et al., 2002; Philpott et al., 2008; Peters & Carroll, 2012; De Melo, 2017).

Los sistemas agroforestales son considerados como uno de los mecanismos de ACI más efectivos para aumentar la seguridad alimentaria, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y aumentar la resiliencia y adaptación al cambio climático (FAO, 2013a). Estos sistemas podrían ayudar a resolver la divergencia de uso identificada en la parte media y alta del CBPC y favorecer el restablecimiento de la conectividad funcional y estructural del paisaje (Concejo Local CBPC, 2011).

En el subcorredor Monteverde ubicado en parte alta del CBPC, existe un proceso de adopción de sistemas agroforestales de café con sombra en los cuales se están implementando prácticas de agricultura conservacionista como el intercalado de cultivos, manejo de la sombra, aprovechamiento de la materia orgánica entre otros (Stuckey *et al.*, 2014). Estas prácticas conservacionistas son el elemento diferenciador del café de Monteverde, el cual ha tenido una adopción exitosa tanto en el mercado nacional como visitante e internacional (Stuckey *et al.*, 2014), por lo que existe una oportunidad potencial de extender el cultivo del café en el territorio como una herramienta de transformación del paisaje hacia un modelo de agricultura sostenible.

## 1.2 PROBLEMA, OPORTUNIDAD Y JUSTIFICACIÓN

### 1.2.1 Preámbulo

A pesar de que los caficultores de Monteverde han adoptado una fuerte posición hacia la producción de café sostenible, no existe en la zona apoyo técnico especializado en agricultura orgánica y conservacionista que les permita avanzar eficientemente en el proceso de establecimiento y transformación de sus sistemas productivos al esquema de sostenibilidad que requieren alcanzar para lograr un mejor posicionamiento económico y ambiental. La mayor parte de las técnicas de producción sostenible que

utilizan son anecdóticas, provienen de otros sistemas de producción y no cuentan con fundamentos científicos validados que aumenten la probabilidad de éxito y eficiencia a nivel del agroecosistema.

Una de las áreas donde existe un vacío importante de información técnica validada científicamente y contextualizada a las condiciones agroecológicas locales para la producción sostenible de café, corresponde a los sistemas de fertilización que se utilizan en la etapa de almácigo, el cual es un eslabón determinante para el rendimiento futuro de este cultivo (Bustamante *et al.*, 2009). Durante esta etapa, el principal objetivo es optimizar el desarrollo fisiológico a nivel radicular, foliar y estructural, así como robustecer las condiciones fitosanitarias de las plántulas para ser trasplantadas a los cafetales en condiciones óptimas, con el fin de favorecer el desarrollo, así como minimizar la mortalidad y susceptibilidad a plagas y enfermedades (Bustamante *et al.*, 2009).

El sistema tradicional de fertilización de almácigo recomendado por las autoridades agropecuarias (ver ICAFE (2013)) no se ajusta a las condiciones agroecológicas ni a los objetivos y necesidades de los caficultores locales, ya que se aplican paquetes de insumos sintéticos que potencialmente podrían ser sustituidos o complementados con sistemas de fertilización más sostenibles desde el punto de vista de rendimiento y congruencia con los objetivos de sostenibilidad.

Alternativamente, al igual que en el resto del país, algunos de los caficultores de Monteverde utilizan mezclas de suelo con broza de café descompuesta y en ciertas ocasiones emplean excretas de animales y abono sintético para la fertilización del almácigo. Estos sistemas de fertilización, aunque han mostrado ser efectivos en condiciones locales, presentan una alta variabilidad en los resultados por lo que requieren ser afinados y validados científicamente con el fin de maximizar su potencial e intensificar sosteniblemente su utilización en el contexto de la ACI. Existe una necesidad evidente de apoyo técnico y logístico para el desarrollo de técnicas efectivas de fertilización orgánica que permitan potenciar la productividad natural de los sistemas productivos.

## 1.2.2 Definición y justificación del problema

El problema específico al cual atiende la presente investigación consiste en que la inexistencia de sistemas de fertilización orgánica para almácigo de café que se encuentren validados científicamente y que estén contextualizados a las condiciones agroecológicas y a las necesidades de los productores de la región de Monteverde, Puntarenas, Costa Rica, conduce a los caficultores a continuar utilizando un sistema de fertilización que es incongruente con los objetivos de sostenibilidad ambiental y con los principios de la agricultura climáticamente inteligente.

El sistema actual de fertilización de almácigos de café combina el uso de fertilizantes sintéticos y orgánicos sin ningún criterio técnico que valide o justifique el empleo integrado de ambos tipos de fertilizantes, hecho que puede reducir la eficiencia del sistema y minimizar la elegibilidad de las plantaciones para ser sometidas a esquemas de certificación que permita que los productos derivados puedan acceder a mercados especializados.

El empleo de fertilizantes sintéticos particularmente es incongruente con los objetivos de sostenibilidad ambiental de los productores locales principalmente porque la lixiviación y evaporación de los ingredientes activos y compuestos presentes en las formulaciones, puede producir serios efectos negativos en la salud del ambiente y los seres humanos, tales como la liberación de gases con efecto invernadero, y la contaminación del suelo y las aguas subterráneas (Tilman *et al.*, 2002; Townsend *et al.*, 2003; Diaz & Rosenberg, 2008; Park *et al.*, 2012). El empleo constante e irracional de insumos sintéticos, aunque tiende a aumentar la productividad del suelo al corto plazo, al largo plazo lo esteriliza, generando dependencia del productor al uso de insumos externos, disminuyendo la capacidad de adaptación y resiliencia de los sistemas productivos al cambio climático, y reduciendo la velocidad y el potencial de transición de las fincas hacia el modelo de sostenibilidad deseado (FAO, 2013b).

El empleo indiscriminado de fertilizantes sintéticos nitrogenados particularmente, puede modificar las propiedades del suelo y comprometer peligrosamente la productividad futura de los sistemas agrícolas y por ende la seguridad alimentaria global (Kotschi,

2015). La utilización excesiva de este tipo de productos reduce el contenido de humus y la biodiversidad del suelo, causa la acidificación y aumenta las emisiones de Óxido Nitroso, un poderoso gas con efecto invernadero cuya capacidad de calentamiento atmosférico es de 296 veces la del CO<sub>2</sub> (FAO, 2006). El aumento de la acidez del suelo disminuye la capacidad de absorción de fosfatos por parte de los cultivos, aumenta la concentración de iones en el suelo e inhibe el crecimiento de las plantas (Kotschi, 2015). Adicionalmente, el agotamiento de humus disminuye la capacidad del suelo de retener nutrientes para su posterior liberación (Kotschi, 2015).

A nivel global existe suficiente evidencia empírica que sugiere que debe iniciarse un proceso de innovación y validación de técnicas efectivas para fomentar la reconstrucción de la fertilidad natural del suelo in situ a través de la incorporación estratégica de materia orgánica en el agroecosistema, con la visión de ir sustituyendo gradual, pero en forma expedita, el empleo de insumos externos (FAO, 2013a, 2014; Kotschi, 2015). Al ser la tecnología del compostaje un recurso que ha demostrado un gran potencial en la agricultura alternativa, el presente trabajo se enfocó en el desarrollo de un sistema de fertilización dirigido a provechar el conocimiento técnico acumulado sobre esa tecnología aplicado a un contexto específico para atender una necesidad puntual que es la producción de almácigo orgánico de café de alta calidad.

### 1.2.3 Oportunidad

Ante el problema planteado, se abre una oportunidad de investigación para desarrollar un sistema de fertilización orgánica para almácigo de café que esté contextualizado a las condiciones agroecológicas y a las necesidades de los productores locales de la zona de Monteverde, por lo que este sistema debe ser congruente con los objetivos de sostenibilidad ambiental de los caficultores, los cuales consisten en propiciar la intensificación sostenible de la productividad de las fincas y aumentar la seguridad alimentaria, así como disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero y aumentar la capacidad de adaptación ante el cambio climático en los sistemas productivos.

El sistema de fertilización también debe promover el aprovechamiento de insumos disponibles en la región, favorecer la preparación de los sistemas productivos para ser sometidos a esquemas de certificación que permitan colocar los productos derivados en mercados especializados y por su supuesto generar un rendimiento óptimo en el desarrollo del almácigo.

#### 1.2.4 Propuesta

La presente investigación tiene como objetivo desarrollar un sistema de biofertilización orgánica para almácigo de café que se ajuste a las condiciones y necesidades de los caficultores de la región de Monteverde, Costa Rica.

El proyecto propone investigar los efectos de la integración de la tecnología del compostaje de residuos biomásicos locales con el empleo de lodos de biodigestor (LDBIO) y microorganismos de montaña (MM) sobre la calidad del compost y aportar un sistema de fertilización orgánico efectivo para almácigo de café.

#### 1.2.5 Justificación

El presente trabajo atiende al llamado global que han hecho las autoridades mundiales como la FAO y el IPCC a los gobiernos, universidades, productores e investigadores para desarrollar alternativas para brindar soluciones viables y efectivas a los problemas actuales de deterioro ambiental, cambio climático y seguridad alimentaria (FAO *et al.*, 2018; IPCC, 2018). Específicamente, el trabajo está dirigido a robustecer la capacidad de adaptación y resiliencia de los sistemas productivos, en este caso del café, a la variabilidad climática, así como a recuperar el potencial productivo y la capacidad de aprovisionamiento de servicios ecosistémicos de los terrenos degradados dentro del Corredor Biológico Pájaro Campana, lo cual consecuentemente puede ayudar a mejorar la seguridad alimentaria, la salud financiera y la calidad de vida de los habitantes de ese territorio.

El sistema de fertilización propuesto es innovador porque aprovecha las sinergias e intercambios de tres tecnologías: compostaje, cultivo de microorganismos del bosque y empleo de biosólidos provenientes de la digestión anaeróbica de aguas residuales, para la biooptimización de un fertilizante que permite brindar resultados de crecimiento del cultivo equivalentes a los de los sistemas de fertilización convencional. El sistema también permite generar simultáneamente oportunidades de reconstruir la fertilidad natural de los agroecosistemas y aprovechar eficientemente los residuos biomásicos de las fincas, logrando así la recuperación y el reciclaje de nutrientes de poca disponibilidad natural como el fósforo. La aplicabilidad del sistema de fertilización propuesto, aunque está contextualizado para el cultivo de almacigo de café en región de Monteverde, tiene el potencial de extenderse a otras zonas cafetaleras con condiciones similares.

¿Por qué compost?

La tecnología del compostaje posee un potencial significativo como herramienta para avanzar hacia la intensificación sostenible de la agricultura (Kotschi, 2015). El compost es un fertilizante multipropósito, nutritivo, biológicamente seguro y físico-químicamente estable que tiene la capacidad de ayudar a construir y mantener la fertilidad natural del suelo a largo plazo (FAO, 2013b; Kotschi, 2015). Es una forma estratégica de incorporar materia orgánica al suelo para la formación de humus y es un mecanismo efectivo para el manejo y aprovechamiento de los residuos orgánicos y el recurso hídrico (FAO, 2013b) que también aporta positivamente en aumentar la capacidad de almacenamiento de carbono en el suelo y en mejorar la productividad natural del agroecosistema (Bot & Benites, 2005a).

La calidad del compost depende no solo de las características del material base sino también del proceso de transformación química y biológica de la materia orgánica (Kotschi, 2015), por lo que es una tecnología que necesita ser refinada y adaptada a condiciones agroecológicas y culturales específicas para asegurar su máximo aprovechamiento (Kotschi, 2015).

¿Por qué microorganismos de montaña (MM)?

Los MM son principalmente colonias de hongos, bacterias y levaduras benéficas que se encuentran de manera natural en bosques, plantaciones y sistemas agroforestales (Suchini Ramírez, 2012). Su principal ventaja reside en que están disponibles libremente y se encuentran ya adaptados a las condiciones agroecológicas de los lugares de donde provienen y pueden ser utilizados (Suchini Ramírez, 2012).

Los MM tienen el potencial de optimizar el proceso de descomposición de la materia orgánica presentes en el compost y el suelo, lo cual puede favorecer la liberación de nutrientes disponibles para el cultivo (Suchini Ramírez, 2012). También ayudan a promover el equilibrio dinámico entre los microorganismos del suelo potenciando procesos de autoregulación y control biológico (Suchini Ramírez, 2012). El empleo de MM representa una forma responsable de utilizar la biodiversidad local.

¿Por qué lodos digeridos de biodigestor (LDBIO)?

La digestión anaeróbica es una tecnología cuya adopción va en aumento, especialmente en el contexto de las fincas integrales y la agricultura climáticamente inteligente (FAO, 2013a). Existe la necesidad de desarrollar soluciones para el manejo de los lodos floculares que se acumulan en los reactores ya que estos tienden a saturar los biodigestores, causando el abandono de esta tecnología por parte de los productores. La integración de los lodos en sistemas de compostaje es una solución innovadora y segura que puede mejorar el contenido de nutrientes del producto resultante.

El empleo de lodos derivados de procesos de digestión anaeróbica en la agricultura ha mostrado resultados positivos como sustitutos de fertilizantes sintéticos (Mantovi *et al.*, 2005). Los biosólidos derivados de la descomposición anaeróbica contienen materia orgánica, N, P y K que pueden ayudar a mejorar la disponibilidad de nutrientes para los cultivos (Mantovi *et al.*, 2005; Sreesai *et al.*, 2013; Kinyua, Zhang, *et al.*, 2016).

El compostaje de los lodos tiende a disminuir el contenido de nutrientes aportados al sustrato final (Mantovi *et al.*, 2005; Sreesai *et al.*, 2013). Sin embargo, los lodos composteados presentan una mayor estabilidad física y biológica, que reduce el riesgo de afectación de las características físicas y microbiológicas del suelo (Sciubba *et al.*, 2014; Joo *et al.*, 2015). La utilización del material composteado es más segura desde la

perspectiva de inocuidad (Sreesai *et al.*, 2013), y minimiza el riesgo de sobredosis de N (Mantovi *et al.*, 2005). El presente proyecto explora la combinación de estos insumos en función de optimizar el desempeño global del material resultante.

¿Cuál es el beneficio de la integración del compost con MM y LDBIO?

El objetivo que se persigue con la integración es el de aprovechar las sinergias e intercambios que potencialmente se podrían generar entre las tecnologías del compostaje, digestión anaeróbica y microorganismos eficientes. Se hipotetiza que la conjugación de estas tres tecnologías puede ayudar a maximizar el contenido de nutrientes disponibles para los cultivos, y generar las condiciones de fertilidad necesarias para el óptimo crecimiento de los cafetos en forma ambientalmente sostenible. Hasta el momento no se conoce el efecto que podría tener esa integración sobre la calidad del compost y el desarrollo del cultivo de almácigo de café, por lo que la presente investigación viene a llenar ese vacío de información.

¿Cómo ésta propuesta es congruente con los objetivos de sostenibilidad ambiental de los productores de Monteverde?

El empleo de compost puede aportar la nutrición necesaria para el óptimo desarrollo del almácigo de café sin la necesidad de utilizar fertilizantes sintéticos, lo cual se alinea con los objetivos de intensificar la producción de las fincas y aumentar la seguridad alimentaria en forma ambientalmente sostenible, ya que los insumos utilizados para elaborar el compost optimizado provienen de fuentes naturales que no representan un riesgo al ambiente y son accesibles a los productores localmente.

El empleo del compost puede ayudar a disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero como el óxido nitroso (al reducir la necesidad de utilizar fertilizantes sintéticos, los cuales normalmente generan emisiones) y aumentar la capacidad de almacenamiento de carbono en el suelo. Asimismo, tiene el potencial de ayudar en la adaptación de los sistemas productivos ante el cambio climático especialmente en lo que respecta al aprovechamiento eficiente del recurso hídrico, debido al amplio potencial de almacenamiento de agua que aporta un mayor contenido de materia orgánica en el suelo.

El empleo de compost puede ayudar a restablecer y mantener la capacidad del ecosistema edáfico de responder de manera efectiva a las afectaciones del cambio climático. El aumento de la resiliencia evita que el sistema pierda su estructura y capacidad de aprovisionamiento de funciones esenciales responsables de mantener la productividad durante y a través de las afectaciones que impone la variabilidad climática.

La utilización de compost en los sistemas agroforestales de café con sombra, donde ya existe una plataforma para la recuperación y el uso intensivo de materia orgánica, puede ayudar a restablecer rápidamente las condiciones naturales de fertilidad y productividad del suelo, así como a proyectar el aprovisionamiento de los beneficios que conlleva el uso estratégico de la materia orgánica a nivel del agropaisaje.

¿Cómo esta propuesta permite aprovechar insumos locales y de bajo costo?

La propuesta está basada en el aprovechamiento de insumos locales y de bajo costo para la producción de un sistema de fertilización efectivo para almácigos de café. En el caso del compost, la materia prima proviene de los desechos biomásicos de las mismas fincas. El empleo de residuos de cosecha, rastrojos y excretas de animales en la elaboración del compost es una forma productiva de manejar los desechos y favorecer el reciclaje de los nutrientes en las unidades de producción.

Los microorganismos de montaña son un recurso de fácil acceso que está a disposición de los productores en bosques y sistemas agroforestales. El aprovechamiento de este recurso es relativamente sencillo, ya que pueden ser reproducidos y almacenados en forma económica y segura.

Los productores locales reconocen el beneficio del empleo de biodigestores en sus fincas como sistemas para la descontaminación productiva de las aguas residuales. Esta tecnología se encuentra en la fase de adopción en la zona y está siendo promovida tanto por entes gubernamentales así como por organizaciones sin fines de lucro dedicadas a apoyar el desarrollo local, por lo que se proyecta que esta herramienta será uno de los principales componentes de la ACI en la región. En la actualidad existen más de 5 biodigestores tubulares de flujo continuo operando en la zona. El aprovechamiento

gradual de los lodos floculares es un mecanismo efectivo para evitar la saturación de los reactores.

¿Cómo esta propuesta ayuda preparar los sistemas productivos para ser sometidos a esquemas de certificación que permitan acceder mercados especializados?

La mayoría de los productores de café de la región cultivan su propio almácigo o lo compran a proveedores regionales o nacionales. En ambos casos, los almácigos son producidos con fertilizantes sintéticos, lo cual no está permitido en los sistemas de certificación de agricultura orgánica. Dependiendo del esquema de certificación al que estén siendo sometidas las fincas, se les exige a los productores un tiempo de desintoxicación del terreno por el uso de insumos sintéticos, el cual es normalmente de tres años. El empleo de compost preparado con insumos de origen natural, es una forma estratégica de adelantarse en el proceso de certificación, o de mantener y propiciar las condiciones a nivel de suelo que le permita a los productores obtener un puntaje óptimo en los sistemas de evaluación.

¿Por qué fertilización de almácigo y no de otras etapas del cultivo?

La presente investigación se enfoca en desarrollar un sistema de fertilización orgánica específicamente para el almácigo, ya que lo que se busca es una forma estratégica de fortalecer las plantas desde de las etapas iniciales de crecimiento, de tal manera que éstas logren alcanzar las condiciones óptimas a la hora de ser trasplantadas, con el fin de favorecer su adaptación y desempeño en las plantaciones. El empleo de material genético de buena calidad (p.ej. con resistencia a ciertas plagas y enfermedades como la roya) en tándem con un régimen de fertilización que propicia un desarrollo adecuado, en términos de rendimiento y estado fitosanitario, se podría traducir a una mejor productividad del agroecosistema a corto, mediano y largo plazo. El empleo del compost derivado del presente estudio podría extenderse a otras etapas del cultivo y a otros sistemas de producción.

¿Cuál es el aporte a la ciencia y el desarrollo?

El aporte a la ciencia y el desarrollo es la validación técnica y científica de un sistema de fertilización orgánica para almácigo de café que responde a las necesidades y objetivos

de sostenibilidad ambiental de los productores de Monteverde y que puede ser extrapolada a otros sectores y sistemas de producción agropecuaria. El sistema de fertilización propuesto expande la oferta de opciones tecnológicas localmente apropiadas que fomenta el aprovechamiento sostenible de recursos naturales y ayuda a aumentar la resiliencia social y ecológica de los caficultores.

¿Cuál es el elemento de innovación?

La presente investigación contiene dos elementos de innovación. El primero consiste en brindar validez técnica y científica a un sistema de fertilización de carácter orgánico. En Costa Rica, la agricultura orgánica es un enfoque de producción emergente que no cuenta con un proceso articulado que invierta en programas de innovación y desarrollo que permita generar soluciones efectivas para maximizar la eficiencia y la adopción de este esquema de producción. La presente investigación es una de las primeras que se realiza en Costa Rica con un nivel de rigurosidad científica apropiado para dar validez a un sistema de fertilización alternativo al sistema convencional.

El segundo elemento de innovación es la experimentación con la integración de la tecnología del compostaje, la digestión anaeróbica y los microorganismos de montaña. Estas tres tecnologías han mostrado individualmente resultados positivos para la intensificación sostenible de la agricultura, pero no han sido aprovechadas ni investigadas en forma integral. La presente es la primera investigación dedicada a experimentar con el empleo combinado de estas tres tecnologías.

¿Cuál es el impacto de la propuesta?

La presente investigación es un paso estratégico en el proceso de transición que está siendo fomentado por los cafetaleros de la zona de Monteverde hacia el modelo de agricultura sostenible, ya que ofrece un sistema de fertilización integral validado con rigor científico para la producción de almácigo orgánico.

Los resultados del trabajo pueden motivar a otros productores no orgánicos a utilizar este método de fertilización y también puede despertar el interés de otros investigadores de utilizar un enfoque científico para validar otras tecnologías de producción sostenible.

El proyecto fue desarrollado en el Campus de la Universidad de Georgia en San Luis de Monteverde a una elevación de 1,100 m.s.n.m. (Lat: 10.28288201 Lon:-84.79803499).

### 1.3 OBJETIVOS

#### 1.3.1 Objetivo general

Desarrollar un sistema de biofertilización orgánica para almácigo de café que se ajuste a las condiciones y necesidades de los caficultores de la región de Monteverde, Costa Rica.

#### 1.3.2 Objetivos específicos

1. Diseñar un sistema de biofertilización orgánica con compost producido a partir de residuos biomásicos locales, microorganismos de montaña y lodos digeridos de biodigestor.
2. Evaluar los parámetros de calidad del compost elaborado.
3. Valorar el efecto del compost producido sobre el desarrollo de almácigos de café.

### 1.4 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿El compost producido a partir de residuos biomásicos locales, microorganismos de montaña y lodos digeridos de biodigestor es un sistema de fertilización viable para la producción de almácigo de café orgánico en la zona de Monteverde?

## 1.5 HIPÓTESIS

El sistema de fertilización con compost producido a partir de residuos biomásicos locales, microorganismos de montaña y lodos digeridos de biodigestor es un sistema de fertilización viable para la producción de almácigo de café orgánico en la zona de Monteverde.

## CAPITULO II: MARCO CONCEPTUAL

### 2.1 APROVECHAMIENTO DE PROCESOS BIOLÓGICOS NATURALES EN LA AGRICULTURA SOSTENIBLE

El esquema de agricultura climáticamente inteligente se enfoca en el establecimiento de agroecosistemas productivos, resilientes y menos vulnerables a los shocks y el estrés que aporta el cambio climático (FAO, 2013a). La implementación de estos modelos agrícolas puede ser operativizada a través del manejo agroecológico (Beddington *et al.*, 2012; FAO, 2013a), en el cual se promueve la construcción de comunidades de plantas y animales que interactúan entre sí y con el medio físico y químico para producir alimentos, fibra, combustible y servicios ecosistémicos (Altieri, 2002).

La implementación de prácticas agroecológicas en los sistemas de producción agropecuaria mimetizan procesos naturales e interacciones biológicas (Ewel, 1999) que optimizan las sinergias entre los elementos que los conforman, a tal punto que el sistema puede llegar a autogestionar la propia fertilidad del suelo, así como la regulación de plagas y enfermedades y la productividad (Altieri, 2002). La incorporación de técnicas agroecológicas generalmente tienen un efecto multifuncional en las fincas, ya que su adopción usualmente produce cambios favorables en varios componentes del sistema (Gliessman, 1998).

La implementación de una estrategia agroecológica a nivel de paisaje y a largo plazo puede guiar el desarrollo agrícola sostenible favoreciendo el alcance de diversos objetivos, tales como la conservación de los recursos naturales y el mantenimiento de niveles continuos de producción agrícola; la reducción de los impactos en el medio ambiente, la adecuación de las ganancias económicas, así como el acercamiento al alcance de las necesidades sociales y económicas de las familias y comunidades rurales (Altieri, 2009).

## 2.2 EL PAPEL DE LA MATERIA ORGÁNICA EN SUELO: COMPOST

Para efectos de producir cultivos saludables y un ambiente propicio para sostener el equilibrio del agroecosistema, una de las estrategias fundamentales del manejo agroecológico es el mantenimiento de la calidad, salud y productividad del suelo a través de la incorporación de materia orgánica en las unidades de producción (Altieri, 2002; Gliessman, 2007; Altieri *et al.*, 2015; Perfecto & Vandermeer, 2015). En principio, la materia orgánica es cualquier tipo de material producido por organismos vivos (plantas o animales) que es regresado al suelo y que experimenta un proceso de descomposición hasta ser convertido en humus (Bot *et al.*, 2005a).

La materia orgánica en el suelo normalmente está conformada por una variedad de componentes, los cuales incluyen, en proporciones fluctuantes y muchas etapas intermedias de descomposición, una fracción orgánica activa de microorganismos (10-40%) y una porción de materia orgánica estable (40-60%) a la cual también se le conoce como humus (Bot *et al.*, 2005a). La mayor parte de la materia orgánica del suelo proviene de tejidos vegetales, los cuales contienen un 60-90% de humedad (Bot *et al.*, 2005a).

La materia seca restante contiene carbono (C), oxígeno (O<sub>2</sub>), hidrógeno (H), y pequeñas cantidades de azufre (S), nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), y magnesio (Mg), los cuales son elementos esenciales para el óptimo crecimiento de los cultivos (Bot *et al.*, 2005a). La acumulación de materia orgánica en el suelo es determinada por las propiedades específicas del suelo tales como la textura, pH, temperatura, humedad, aireación, presencia de arcillas y la actividad biológica. La materia orgánica también modifica algunas de estas propiedades (Bot *et al.*, 2005a).

La principal función de la materia orgánica en el suelo es el mejoramiento de la estructura y del contenido de nutrientes (Altieri, 2002), así como la formación de hábitat favorable para propagación de microorganismos beneficiosos en el control biológico (Campbell, 1989). La adición planificada de material orgánico procesado puede servir como fuente de sustancias estimuladoras de crecimiento tales como el ácido indol-3-acético, así como el ácido húmico y fúlvico (Magdoff & Van Es, 2000).

Existe evidencia acerca de que los cultivos que crecen en suelos ricos en materia orgánica son menos susceptibles al ataque de enfermedades (Luna, 1988). Muchos estudios sugieren que la susceptibilidad de los cultivos a plagas de insectos y patógenos puede ser afectada por la forma de fertilización utilizada (orgánica versus química) (Scriber, 1984). El uso de fertilizantes inorgánicos puede causar desbalances nutricionales y disminuir la resistencia de los cultivos a las plagas y enfermedades (Nicholls & Altieri, 2006).

La incorporación de materia orgánica mejora la capacidad de retención de agua del suelo, reduciendo la evaporación y regulando la humedad (FAO, 2013b; Altieri *et al.*, 2015), lo cual aporta un efecto positivo en la tolerancia de los cultivos a escenarios de déficit hídrico. También tiene un efecto importante en el mejoramiento de la infiltración, lo cual disminuye la escorrentía durante periodos intensos de precipitación (Altieri *et al.*, 2015). Los suelos ricos en materia orgánica usualmente contienen asociaciones simbióticas, tales como micorrizas arbusculares, las cuales mejoran los mecanismos de absorción de agua de las plantas incrementando la tolerancia de los cultivos a la sequía (Garg & Chandel, 2010).

El incremento de la materia orgánica en suelo en ausencia de arado puede convertir los suelos agrícolas en sumideros de carbono (Bot *et al.*, 2005a). La fracción estable de la materia orgánica del suelo contribuye a la capacidad de retención de nutrientes, por lo que suelos con mayor contenido de materia orgánica exhiben una mejor capacidad de intercambio catiónico (Bot *et al.*, 2005a). Existen diferentes fuentes de materia orgánica que pueden ser incorporadas al suelo. Las más utilizadas en sistemas agroecológicos son excretas de animales, hojas de árboles, residuos de cosecha y compost (Altieri *et al.*, 2015).

La elaboración y aplicación de compost en particular es una forma estratégica de mejorar el contenido de materia orgánica en el suelo porque proporciona la posibilidad de transformar, en forma segura, los residuos orgánicos en insumos para la producción agrícola (FAO, 2013b). El compostaje consiste en la descomposición y estabilización biológica de sustancias orgánicas, bajo condiciones aeróbicas (con presencia de oxígeno) y termofílicas (>45°C) que resultan del calor producido biológicamente, lo cual

genera un insumo estable y libre de patógenos y semillas, que puede ser aplicado directamente al suelo (Haug, 1993; Composting council, 1996).

No todos los materiales que han sido transformados aeróbicamente, son considerados compost debido a que el proceso de compostaje incluye diferentes etapas que deben cumplirse para obtener compost seguro y de calidad (FAO, 2013b). La utilización de un material que no haya finalizado correctamente el proceso de compostaje puede acarrear riesgos como fitotoxicidad, bloqueo biológico del nitrógeno, reducción de oxígeno radicular así como exceso de amonio y nitratos en las plantas y contaminación de fuentes de agua (FAO, 2013b).

Para efectos de lograr la producción eficiente de compost, es necesario que el material utilizado atraviese las cuatro fases del compostaje, las cuales incluyen según FAO (2013b), la fase mesófila ( $\leq 45^{\circ}\text{C}$ ), termófila ( $> 45^{\circ}\text{C}$ ), la fase de enfriamiento o mesófila II ( $\leq 45^{\circ}\text{C}$ ) y la etapa de maduración (3-6 meses).

En vista de que el compostaje es un proceso biológico, se deben tomar en consideración los parámetros que afectan el crecimiento y reproducción de los microorganismos tales como la temperatura del sistema ( $35\text{-}70^{\circ}\text{C}$ ), así como la humedad del sustrato (45-60%), el nivel de saturación de oxígeno (5-10%), el nivel de producción de dióxido de carbono ( $2\text{-}3\text{ kg/t/día}$ ), el pH (5.8-7.2), el tamaño de la partícula (5-20 cm) y la relación C:N (35:1-15:1). Los datos reportados entre paréntesis representan los rangos óptimos de los parámetros según FAO (2013b).

El compost semi-maduro (en fase mesófila II) presenta una actividad biológica elevada y un porcentaje mayor de nutrientes asimilables. Sin embargo, al no tener un pH estable (tendiente a la acidez), puede afectar negativamente la germinación, por lo que no debe ser utilizado para germinar semillas o en cultivos frágiles. La aplicación de compost en horticultura puede hacerse con  $4\text{-}5\text{ Kg/m}^2$ , mientras que en cultivos extensivos la aplicación puede hacerse de  $7\text{-}10\text{ T/ha}$  (FAO, 2013b).

El compost preparado adecuadamente contiene sustancias fertilizantes para las plantas, aunque en forma orgánica y en menor proporción que los fertilizantes minerales sintéticos, por lo que puede ser empleado como una fuente de materia orgánica (con las

ventajas que esto conlleva) que también posee nutrientes tanto disponibles como de lenta liberación (Beltrán *et al.*, 2002; Golabi *et al.*, 2007; FAO, 2013b). Sin embargo, el contenido de nutrientes en el compost presenta una amplia variabilidad ya que las concentraciones dependen del manejo y de las características de los materiales de origen. La cantidad de N puede oscilar entre 3-15 g/Kg-compost, mientras que P puede variar entre 1-10 g/Kg-compost y el K puede fluctuar entre 3-10 g/Kg compost (FAO, 2013b).

Cada cultivo presenta necesidades específicas de nutrientes por lo que la capacidad del compost para proveer la totalidad de los requerimientos nutricionales depende en gran medida de su calidad, por lo que no se puede garantizar que el compost tiene la capacidad de proveer las demandas totales de nutrición. Para efectos de asegurar la provisión apropiada de nutrientes en los cultivos, los productores deben tomar en cuenta que se pueden llevar a cabo combinaciones del compost con otros tipos de fertilizantes (FAO, 2013b), las cuales bajo un esquema de manejo agroecológico, deben provenir preferiblemente de sistemas que promuevan el reciclaje y la recuperación de nutrientes.

En el caso del sistema propuesto en el presente estudio para la producción de almácigo de café, se propone investigar los efectos de la integración de la tecnología del compostaje de residuos biomásicos locales con el empleo de lodos de biodigestor y microorganismos de montaña sobre la calidad del compost y aportar un sistema de fertilización orgánico efectivo para almácigo de café. La incorporación de los microorganismos de montaña puede optimizar el proceso de descomposición de la materia orgánica y favorecer la liberación de nutrientes, mientras que la adición de los lodos digeridos de biodigestor podría mejorar el contenido de nutrientes.

### 2.3 EL PAPEL DE LA BIODIVERSIDAD EN SUELO: MICRORGANISMOS DE MONTAÑA (MM)

La biodiversidad es un elemento fundamental en el manejo agroecológico, ya que es el componente que regula y provee las sinergias e intercambios que permiten el adecuado funcionamiento del agroecosistema (Altieri & Nicholls, 2004; Bot *et al.*, 2005a; Gliessman,

2007; FAO, 2013a; Altieri *et al.*, 2015). La biodiversidad regula las funciones del ecosistema porque la variedad de especies o genotipos desarrollan funciones levemente distintas entre sí al desempeñar diferentes nichos ecológicos (Vandermeer *et al.*, 1998). En términos generales, existen más especies que nichos en el ecosistema, lo cual produce una redundancia de componentes que mejora sus funciones, debido a que esos factores redundantes son los que generalmente actúan cuando ocurren cambios en el ambiente, permitiendo que el ecosistema continúe produciendo servicios ecosistémicos (Lin, 2011).

El mantenimiento de la biodiversidad no solo es importante en la superficie del agroecosistema, sino que es también esencial en el suelo, donde existe una amplia variedad de organismos que cumplen funciones indispensables en la dinámica ecológica que favorecen el mantenimiento de la salud y la productividad (Altieri, 2002; FAO, 2013a). La biota del suelo está conformada por una serie de organismos que interactúan entre sí y con el medio ambiente formando redes alimenticias complejas (Bot *et al.*, 2005a). Estos organismos se clasifican en cuatro grupos de acuerdo a su tamaño: macrofauna (>2 mm de diámetro), mesofauna (0.1 a 2 mm diámetro), microfauna (<0.01 mm de diámetro) y microorganismos (<0.1 mm en diámetro) (Swift *et al.*, 1979; Bot *et al.*, 2005a).

Los microorganismos poseen la particularidad de ser extremadamente abundantes. Incluyen algas, bacterias, cianobacterias, hongos, micorrizas, levaduras, mixomicetos y actinomicetos. La principal función que desempeñan es la descomposición de la materia orgánica en sustancias menos complejas. También participan en la formación de agregados, la descomposición de compuestos tóxicos tanto metabólicos como agroquímicos, y en la fijación de nitrógeno (Bot *et al.*, 2005a). Algunos organismos del suelo (principalmente hongos) también pueden causar plagas y enfermedades (Bot *et al.*, 2005a), por lo que el mantenimiento de la biodiversidad es vital para el control biológico (Altieri *et al.*, 2015).

La implementación de prácticas agrícolas, como la mecanización y el empleo de agroquímicos, así como la remoción de la cobertura vegetal, alteran significativamente el equilibrio dinámico de las poblaciones de microorganismos del suelo a consecuencia de los cambios que esas actividades provocan en la composición de la comunidad de

organismos (Bot *et al.*, 2005a). Sin embargo, ese equilibrio puede ser restaurado, al menos en forma parcial, a través de la incorporación intencional de microorganismos en los agroecosistemas (Bot *et al.*, 2005a).

Uno de los métodos artificiales utilizados en la restauración de la comunidad de microorganismos del suelo, consiste en la aplicación de cultivos de microorganismos eficientes, o EM a como se les conoce por sus siglas en inglés (Efficient Microorganisms). El EM es un producto comercial que fue introducido al mercado en las décadas de 1980 y 1990 por Higa & Wididana (1991), quienes concluyeron, a partir de sus estudios, que la incorporación de este compuesto al suelo y la aplicación directa a las plantas puede producir beneficios sobre la salud y el rendimiento del agroecosistema.

Utilizando métodos de síntesis biotecnológicas, Higa y su equipo desarrollaron tres mezclas de microorganismos, las cuales patentaron y comercializaron bajo las marcas EM2, en el que reporta 80 especies de bacterias, hongos y levaduras; EM3, que consiste en un cultivo de bacterias fotosintéticas, y EM4 que contiene una mezcla de bacterias del género *Lactobacillus* y otros microorganismos que producen ácido láctico (Higa *et al.*, 1991). Higa *et al.* (1991) reportan que los suelos tratados con EM obtienen la capacidad, a través de los microorganismos, de auto-reprimir enfermedades, liberar sustancias fermentativas y fijar nutrientes por sí solos, resultando en un mejor rendimiento de los cultivos.

A pesar de que algunos autores como Chamberlain *et al.* (1997), Hussain *et al.* (1999), Khaliq *et al.* (2006), Villagra *et al.* (2006), Díaz Barragán *et al.* (2009), Ndonga *et al.* (2011), Talaat *et al.* (2015) confirman la efectividad de EM sobre variables relacionadas a la salud o rendimiento de los cultivos a través de ensayos elaborados con EM comercial, otros han reportado efectos no significativos o poco consistentes (Ronzelli *et al.*, 1999; Van Vliet *et al.*, 2006; Formowitz *et al.*, 2007; Mayer *et al.*, 2010), por lo que se recomienda más investigación el tema, principalmente por el hecho de que al ser los EM una mezcla estandarizada, no es razonable esperar que el efecto sea siempre consistente en diferentes escenarios agroecológicos.

Un método alternativo emergente para el enriquecimiento del suelo con microorganismos es a través del empleo de microorganismos de montaña (MM). Estos microorganismos

son principalmente colonias de hongos, bacterias y levaduras benéficas que se encuentran de manera natural en bosques, plantaciones y sistemas agroforestales (Suchini Ramírez, 2012). Su principal ventaja reside en que están disponibles libremente y se encuentran ya adaptados a las condiciones agroecológicas de los lugares de donde provienen y pueden ser utilizados. Estos son incorporados al suelo como biofertilizantes con el objetivo de optimizar la descomposición de la materia orgánica para fomentar la liberación de nutrientes disponibles para las plantas, y promover el equilibrio dinámico entre los microorganismos del suelo que participan en procesos de autorregulación y control biológico (Suchini Ramírez, 2012).

Campo-Martínez *et al.* (2014) y Acosta Almánzar (2012) compararon la efectividad de EM vs MM sobre cultivos de acelga y tomate respectivamente. Ambos estudios detectaron una efectividad superior del MM en condiciones locales sobre un número considerable de variables medidas en los ensayos, lo cual deja en evidencia el potencial de los MM como una herramienta para el manejo agroecológico, por lo que es necesario y pertinente llevar a cabo investigaciones más profundas para continuar validando científicamente y afinando esta tecnología con el fin de maximizar su aprovechamiento en la agricultura sostenible.

## 2.4 LODOS DIGERIDOS DE BIODIGESTOR (LDBIO)

El manejo de excretas de animales a través de la digestión anaeróbica es una práctica que puede aportar una cantidad importante de beneficios en sistemas de producción mixtos (FAO, 2013a). Entre ellos, el más significativo, es la remoción de una proporción importante de materia orgánica contaminante, lo cual se logra a través de la actividad biológica de arqueas metanogénicas que transforman los sólidos volátiles en biogás, subproducto que puede ser empleado como biocombustible para la cocción directa de alimentos o para la producción de electricidad (Botero & Preston, 1987).

La digestión anaeróbica de aguas residuales puede ser implementada a través del empleo de biodigestores tubulares de flujo continuo (Botero *et al.*, 1987), cuyo efluente puede ser utilizado como biofertilizante debido a que usualmente posee un buen

contenido de nutrientes asimilables que están disponibles para los cultivos (Ferrer *et al.*, 2011). Esta tecnología permite la reducción del riesgo de transmisión biológica de enfermedades, ya que durante el proceso de descomposición es posible eliminar hasta el 95% de los huevos de parásitos y una cantidad significativa de bacterias y protozoarios causantes de la disentería (McGarry & Stainforth, 1978; Kinyua, Wald, *et al.*, 2016).

El porcentaje de remoción de la carga contaminante, así como la cantidad y el contenido de biogás y la concentración de nutrientes del efluente depende del tipo de excretas y materiales que atraviesan el proceso de biodigestión, así como del diseño y el manejo del sistema (Botero *et al.*, 1987). La capacidad de remoción de carga contaminante en un sistema tubular de flujo continuo de 16 m<sup>3</sup> instalado en el 2011 en Monteverde, Costa Rica, y que fue alimentado por 4 años con excretas porcinas y vacunas, logró alcanzar un porcentaje de remoción de 99% del DBO, un 88% de los sólidos totales y un 89 % de los sólidos volátiles (Kinyua, Zhang, *et al.*, 2016). En este mismo sistema la concentración total de N amoniacal del efluente fue de  $52.8 \pm 4.66$  mg NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N/L, mientras que el contenido total de N fue de  $49.3 \pm 5.12$  mg N/L, y el contenido de P registró  $33.9 \pm 8.91$  mg PO<sub>4</sub>/L. El pH se mantuvo neutro en  $7.04 \pm 0.14$ , en tanto el contenido de CH<sub>4</sub> en el biogás fue de  $71 \pm 10\%$ , y la producción diaria de CH<sub>4</sub> se mantuvo en  $2.01 \pm 0.87$  m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>.

Los resultados obtenidos por Kinyua, Zhang, *et al.* (2016) son congruentes a los reportados por otros autores en cuanto al porcentaje de cambio de la demanda biológica de oxígeno (DBO) y el pH en el efluente durante el proceso anaeróbico, así como con respecto a los contenidos de CH<sub>4</sub> en el biogás (Chará *et al.*, 1999; Lansing *et al.*, 2010). Las concentraciones totales de N y P reportados por Kinyua, Zhang, *et al.* (2016) en el efluente son menores a las registradas por otros autores como da Silva *et al.* (2012), Lansing *et al.* (2010) y Borin & Frankow-Lindberg (2006), lo cual se debe a las altas tasas de remoción de esos elementos (83.6% y 91.6%, respectivamente) que fueron detectadas en el sistema analizado (Kinyua, Zhang, *et al.*, 2016), hecho que aporta evidencia sobre la acumulación de sólidos y la formación de lodos floculares dentro del reactor (Kinyua, Zhang, *et al.*, 2016). En vista de que la digestión anaeróbica no presenta mecanismos para la remoción de N y P, los autores indican que estos iones pueden

formar estruvita ( $MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$ ), material que tiende a adherirse a los sólidos dentro del reactor, con lo cual se espera que el contenido de esos nutrientes en el lodo flocular sea significativo.

El empleo de lodos derivados de procesos de digestión anaeróbica en la agricultura han mostrado resultados positivos como sustitutos de fertilizantes sintéticos cuando son aplicados en concentraciones adecuadas que no excedan los niveles de tolerancia de los cultivos (Mantovi *et al.*, 2005). La utilización de estos residuos biosólidos también tienen el potencial de incrementar el nivel de materia orgánica en el suelo, así como la disponibilidad de N, P y K total, reduciendo al mismo tiempo la alcalinidad del sustrato (Mantovi *et al.*, 2005). Sin embargo, el contenido de nutrientes en lodos resultantes de procesos anaeróbicos es variable (Sreesai *et al.*, 2013) ya que depende de múltiples factores incluyendo las características del influente y el manejo del sistema. Por ejemplo, el contenido de N total (porcentaje de materia seca) reportado para 6 sistemas anaeróbicos investigados por Mantovi *et al.* (2005) y Sreesai *et al.* (2013) osciló entre  $1.9 \pm 0.7$  y 6.12, mientras que el P total se mantuvo entre 0.94 y  $10.6 \pm 5.9$  (porcentaje de materia seca) y el K total entre 0.71 y 1.71 (porcentaje de materia seca).

El compostaje de los lodos tiende a provocar una disminución del contenido de nutrientes en el material terminado debido a que la actividad microbiana normalmente consume una parte de los compuestos disponibles (Mantovi *et al.*, 2005; Sreesai *et al.*, 2013). Sin embargo, el compostaje es un mecanismo apropiado para la regulación de la estabilidad y madurez de este material (Sciubba *et al.*, 2014; Joo *et al.*, 2015), que también mejora las condiciones de inocuidad (Sreesai *et al.*, 2013) y reduce el riesgo de sobredosis de N que es frecuente con la aplicación de lodos crudos (Mantovi *et al.*, 2005). El empleo de lodos digeridos de biodigestor como mecanismo para la recuperación de nutrientes en sistemas productivos diversificados representa una oportunidad para mejorar el contenido nutritivo del compost que requiere ser investigada.

## 2.5 REQUERIMIENTOS NUTRICIONALES DEL ALMÁCIGO DE CAFÉ

El almácigo de café requiere de los mismos elementos nutricionales que las plantas adultas para efectos de lograr un óptimo desarrollo (Chaves Arias, 2012). Según Alvarado & Rojas (1994), el café requiere de al menos 16 elementos nutritivos esenciales; tres de ellos, el C, el H y el O<sub>2</sub>, la planta los obtiene del aire y del agua; mientras que los trece restantes son extraídos del suelo mediante el sistema radicular, aunque algunos pueden ser absorbidos por el sistema foliar. De estos nutrientes, el N, P y K son considerados elementos primarios ya que tienen una mayor demanda, mientras que el Ca, Mg y S son categorizados como elementos secundarios por tener tasas de absorción intermedia. Por su parte, el Zn, Cu, Fe, Mn, Cl y el Mo son considerados elementos menores ya que la planta los necesita en cantidades mínimas.

En la etapa de germinación, la cual tiene una duración de aproximadamente 1.5 a 2 meses, las semillas se siembran en arena y no requieren la adición de nutrientes, ya que las reservas nutritivas contenidas en las mismas suplen las necesidades de las plántulas hasta alcanzar su desarrollo completo como copitas, por lo que durante esta etapa el enfoque de manejo debe estar dirigido a la regulación del nivel de humedad, luminosidad, temperatura y condiciones fitosanitarias (Sadeghian, 2008).

La nutrición de las plántulas de café depende en gran medida de las características físicas, químicas y biológicas del sustrato que se utilice para su crecimiento (Chaves Arias, 2012). De acuerdo con Chaves Arias (2012) el programa de fertilización deberá guardar un equilibrio, en el que se eviten deficiencias nutricionales, como consecuencia de un bajo suministro de fertilizantes, o “quemadas” por un exceso de insumos.

Existe una amplia variedad de sistemas de fertilización registrados para lograr un óptimo desarrollo del almácigo de café. Por ejemplo, Chaves Arias (2012) indica que el sustrato de crecimiento debe contener al menos 2 partes de tierra, una de granza de arroz, y una de broza de café descompuesta para alcanzar un nivel de desarrollo deseable. Cuando no se cuenta con los insumos para elaborar una mezcla adecuada de suelo y abono orgánico, Avila *et al.* (2007) y Sadeghian (2008) recomiendan aplicar 4 gramos de fertilizante Superfosfato Triple o de Fosfato Diamónico (DAP) por cada unidad de crecimiento, mientras que Chaves Arias (2012) recomienda aplicaciones mensuales de 1.5 a 2 gramos por bolsa de DAP durante los primeros tres meses y hacer las

aplicaciones de los meses siguientes con fórmulas completas hasta que salga el almácigo. La aplicación de DAP contribuye a reducir los efectos nocivos de los abonos orgánicos parcialmente descompuestos (Avila *et al.*, 2007).

El ICAFE (2013) recomienda una aplicación de 2 gramos por bolsa de NPK 10:30:10 durante los primeros dos meses a partir del desarrollo del primer par de hojas, y de fórmula completa (p.ej. 18 5 15 6 0.66) durante los siguientes meses. Una vez que se realice el trasplante de las copitas a las unidades de crecimiento y donde deberán permanecer por 6-8 meses hasta el traslado al campo, las plantas normalmente responden de manera positiva a la materia orgánica contenida en el sustrato, así como a la aplicación de P (Sadeghian, 2008).

Según información de Salazar-Arias (1977), la aplicación de fertilizante sintético no siempre produce efectos positivos sobre el crecimiento del almácigo ya que a partir de ensayos realizados, este autor reporta que la respuesta obtenida a la fertilización del almácigo con N fue negativa, mientras que la incorporación de K no mejoró el vigor de la planta en términos de peso seco y altura (Salazar-Arias, 1977). En esta misma línea de ideas, Guzman & Riaño (1996) indican que las aplicaciones de fertilizantes foliares no tuvieron ningún efecto sobre el desarrollo y vitalidad del cultivo, lo cual sugiere que la aplicación de fertilizantes sintéticos en el café no siempre es necesaria, y que el empleo de ese tipo de insumos en forma generalizada y sin fundamentos técnicos puede ocasionar dependencia del agricultor (FAO, 2013b), así como impactos ambientales y a la salud humana que podrían ser evitados (Mosier *et al.*, 2013; FAO, 2014). Es necesario desarrollar sistemas de fertilización orgánica que aporten no solo un óptimo rendimiento, sino que también ayuden a mantener la fertilidad y productividad natural del sistema de producción de café.

Avila *et al.* (2007) sugieren que el efecto benéfico de los abonos orgánicos en el desarrollo de almácigos está sujeto al nivel de madurez y estabilidad que presente el material a la hora de ser aplicado al cultivo. Mestre (1973) indica que una mezcla de suelo y pulpa de café bien descompuesta en relación 1:1 es suficiente para suplir las necesidades nutricionales del almácigo. Salazar-Arias (2000) reporta que cuando se dispone de otras fuentes nutritivas, como lombrinaza, gallinaza, pollinaza, estiércol

vacuno o cenichaza, esta relación se puede reducir a 3:1. Este autor encontró que la inoculación del sustrato de crecimiento con micorrizas vesículo-arbusculares (HMA) en relación de suelo-humus de lombriz 5:1, produjo rendimientos de almácigo similares a los alcanzados con sistemas de fertilización convencionales, lo cual indica que la incorporación de materia orgánica procesada y microorganismos eficientes en el sistema de producción de almácigo de café es una alternativa potencial para el suministro de nutrientes para este cultivo.

## CAPITULO III: MATERIALES Y METODOS

Para efectos de desarrollar un sistema de biofertilización orgánica para almácigo de café que se ajuste a las condiciones y necesidades de los caficultores de la región de Monteverde, Costa Rica, se llevaron a cabo tres etapas en forma lógica y secuencial. La primera etapa consistió en diseñar un sistema de biofertilización orgánica con compost producido con residuos biomásicos locales, microorganismos de montaña y lodos digeridos de biodigestor. Esta etapa se ejecutó de acuerdo a metodologías validadas para asegurar la replicabilidad de las características del material resultante. La segunda etapa consistió en evaluar los parámetros de calidad del compost optimizado a través de pruebas estandarizadas de laboratorio. La tercera etapa consistió en valorar el efecto del compost producido sobre el desarrollo de almácigos de café, con la cual se completó el proceso de desarrollo del sistema de fertilización y se contó con la información necesaria para responder la pregunta de investigación.

### 3.1 OBJETIVO ESPECÍFICO 1: DISEÑAR UN SISTEMA DE BIOFERTILIZACIÓN ORGÁNICA CON COMPOST PRODUCIDO A PARTIR DE RESIDUOS BIOMÁSICOS LOCALES, MM Y LDBIO.

#### Diseño y preparación de abonos

Utilizando referencias como el Manual de Compostaje para el Agricultor de FAO (2013b) y el libro sobre Agricultura Climáticamente Inteligente (FAO, 2013a), se diseñaron y posteriormente se prepararon 6 diferentes tipos de compost utilizando residuos biomásicos, cultivos de microorganismos de montaña y lodos digeridos de biodigestor provenientes de la Finca Experimental para la Agricultura Sostenible de la Universidad de Georgia, ubicada en San Luis de Monteverde, Puntarenas, Costa Rica, N 10° 16' 58.38", O -84° 47' 52.93", elevación 1,100 m.s.n.m. Los compost fueron elaborados siguiendo la metodología de FAO (2013b) empleando una mezcla base de 460 kilogramos de biomasa fresca compuesta de 200 kilogramos de residuos de cosecha de hortalizas, legumbres y frutales, 200 kilogramos de hojas de banano y 60 kilogramos de astillas de madero negro (*Gliricidia sepium* [Jacq.] Kunth), procurando una relación C:N

de 30:1 a 35:1. En el Cuadro 1 se muestra la composición de cada uno de los compost elaborados.

Cuadro 1. Composición de los compost elaborados para desarrollar un sistema de biofertilización orgánica para almácigo de café en el distrito de Monteverde, Puntarenas, Costa Rica. Monteverde, Costa Rica. 2016-2017.

Nombre	Descripción del compost
COPURO	Compost puro: mezcla base más 10 kg de agua al inicio de la elaboración del compost y un promedio de 0.8 kg H <sub>2</sub> O/día durante la etapa de estabilización.
COMMR	Compost con MM: mezcla base más 10 kg de MMR líquido activado al inicio de la elaboración del compost y un promedio de 0.8 kg MMR/día durante la etapa de estabilización. La R significa que el cultivo de MM lleva todos los compuestos citados en la metodología de elaboración, incluyendo el inóculo de microorganismos presentes la hojarasca y el humus del suelo del bosque.
COMMP	Compost con MM placebo: mezcla base más 10 kg de MMP líquido activado aplicado al inicio de la elaboración del compost y un promedio de 0.8 kg MMP/día durante la etapa de estabilización. La P significa que el cultivo de MM lleva todos los compuestos citados en la metodología de elaboración, excepto el inóculo de microorganismos presentes en la hojarasca y el humus del suelo del bosque, esto para discriminar que el efecto optimizador esté realmente asociado a la incorporación de los microorganismos en el cultivo.
COLDB	Compost con LDBIO: mezcla base más 40 kg de LDBIO, 10 kg de agua al inicio de la elaboración del compost y un promedio de 0.8 kg H <sub>2</sub> O/día durante la etapa de estabilización.
COMMR LDBA	Compost con MMR y LDBIO A: mezcla base más 40 kg de LDBIO, 10 kg de MMR líquido activado al inicio de la elaboración del compost y un promedio de 0.8 kg MMR /día durante la etapa de estabilización.
COMMR LDBB	Compost con MMR y LDBIO B: Compost puro elaborado con 200 kg de residuos de brosa de café, 200 kg de hojas de banano y 60 kilogramos de astillas de madero negro, 40 kg de LDBIO, 10 kg de MMR líquido activado al inicio de la elaboración del compost y un promedio de 0.8 kg MMR/día durante la etapa de estabilización.

Los MM fueron elaborados siguiendo la metodología de Suchini Ramírez (2012) utilizando hojarasca y humus del suelo del bosque de la Reserva Forestal del Campus de la Universidad de Georgia. Los LDBIO fueron extraídos de uno de los biodigestores tubulares de flujo continuo de la Finca Experimental para la Agricultura Sostenible de la Universidad de Georgia, el cual es alimentado con excretas porcinas y bovinas en suspensión 1:4; estos tuvieron un periodo de acumulación de 5 años en el reactor. Durante el proceso de elaboración del compost se realizó un monitoreo diario de la

temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), el contenido de agua ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ ), y la conductividad eléctrica ( $\text{dS}/\text{m}$ ) en cada pila de compost utilizando un multisensor Decagon GS3 Stereo. La saturación de oxígeno (%) dentro de cada montículo fue registrada con un sensor Apogee y el pH con un sensor portátil Kelaway. Los datos fueron almacenados directamente en una hoja electrónica de Excel a partir de los cuales se realizaron análisis comparativos con estadísticas descriptivas de las variables registradas a lo largo del proceso de producción del compost.

Estas variables fueron utilizadas como proxy para determinar la viabilidad técnica del diseño y el mecanismo de procesamiento del compost. Según FAO (2013b), el cumplimiento del compostaje dentro de los rangos óptimos en dichas variables aumentan las probabilidades de producir un compost de óptima calidad, debido a que el comportamiento de las mismas afecta directamente el crecimiento y la reproducción de los microorganismos responsables del proceso de compostaje. En el caso de la temperatura, un diseño viable de la mezcla de materiales debe exhibir el cumplimiento de tres etapas. En la primera de ellas, denominada la etapa mesófila, la pila de compost debe experimentar un aumento en la temperatura hasta los  $45^{\circ}\text{C}$  debido al incremento de la actividad microbiana que participa en la descomposición de materiales con estructura molecular simple como carbohidratos. Esta primera etapa se alcanza en los primeros dos a cinco días del proceso y es seguida por la etapa termófila, en la que la temperatura continúa aumentando hasta alcanzar más de  $50^{\circ}\text{C}$  donde ocurre la degradación de ceras y hemicelulosas que perdura por 1 a 3 semanas, dependiendo de las características del material. Posteriormente, la temperatura debe decrecer durante la etapa mesófila dos, donde ocurre la degradación de materiales con estructuras más complejas, la cual se extiende por dos a cinco semanas hasta llegar a temperatura ambiente. Después de haberse cumplido esas tres etapas, el compost entra en un periodo de maduración y estabilización que puede extenderse por tres a seis meses donde la temperatura se mantiene constante.

En cuanto a las otras variables que son importantes para el monitoreo del proceso de compostaje, FAO (2013b) indica que la humedad en la pila de compost debe mantenerse entre 50 a 60% en la etapa mesófila, de 45 a 55% en la etapa termófila y entre 30 y 40%

en la etapa mesófila dos y durante el periodo de maduración. La saturación de oxígeno en el medio no debe bajar del 5%, siendo 10% el nivel óptimo. El pH se acidifica (6.5-8) en la etapa mesófila por la formación de ácidos orgánicos, en la fase termófila aumenta (6-8.5), debido a la conversión del amonio en amoniaco, para finalmente estabilizarse en valores cercanos al neutro. El compost maduro debe mostrar una conductividad eléctrica menor a 10 mS/cm (US Composting Council, 2002) para asegurar que no haya problemas de salinidad en el sustrato.

## 3.2 OBJETIVO ESPECÍFICO 2: EVALUAR LOS PARÁMETROS DE CALIDAD DEL COMPOST ELABORADO.

### 3.2.1 ANÁLISIS QUÍMICOS

Se determinó la composición química de una muestra de 500 g de MM y LDBIO, así como de los compost puros utilizando la metodología de digestión de tejidos descritas en Garfield *et al.* (2000) y Kalra (1998). Estos análisis consistieron en la determinación de las concentraciones de macroelementos (N,P,K y S) y microelementos (Ca, Mg, Fe, Cu, Mn, Zn y B), así como en el cálculo de los valores de humedad, pH, conductividad eléctrica, concentración de carbono y la relación C/N. Los análisis fueron hechos en el Laboratorio de Suelos y Tejidos del Centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica. Todas las muestras fueron tomadas en forma individual de acuerdo a los protocolos de dicho centro. Los materiales fueron homogenizados antes del muestreo para efectos de estandarizar la representatividad de los resultados. Los diferentes análisis fueron hechos a las mismas muestras y no se hicieron repeticiones para efectos evitar incurrir en costos innecesarios ya que el laboratorio cuenta con el personal y equipos certificado que garantiza un alto nivel de confianza en los resultados de las pruebas.

### 3.2.2 ANÁLISIS MICROBIOLÓGICOS

Se determinó la concentración de bacterias, actinomicetes y hongos de una muestra de 500 g de MM y LDBIO utilizando el procedimiento de recuentos de microorganismos viables en placas petri siguiendo la metodología de Wollum (1982), Lorch *et al.* (1995) y Rodríguez *et al.* (2005). También se determinó el contenido de biomasa microbiana (mg C/kg suelo) de una muestra de 500 g de cada uno de los abonos elaborados utilizando el método de extracción-fumigación de Vance *et al.* (1987). Ambos procedimientos se llevaron a cabo en el Laboratorio de Microbiología Agrícola del Centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica. Todas las muestras fueron tomadas en forma individual de acuerdo a los protocolos de dicho centro. Los materiales fueron homogenizados antes del muestreo para efectos de estandarizar la representatividad de los resultados. Los diferentes análisis fueron hechos a las mismas muestras y no se hicieron repeticiones para efectos evitar incurrir en costos innecesarios ya que el laboratorio cuenta con el personal y equipos certificado que garantiza un alto nivel de confianza en los resultados de las pruebas.

### 3.2.3 PRUEBAS DE INOCUIDAD, ESTABILIDAD, MADUREZ

La inocuidad de los compost fue evaluada a través de la detección de *E. coli* (NMP/100 g) de acuerdo a la metodología de Clesceri *et al.* (1998) y US Composting Council (2002). La estabilidad de los compost se determinó utilizando como parámetro la respiración microbiana presente en las muestras según la metodología de Jenkinson & Powlson (1976). La madurez de los abonos fue determinada por medio de la prueba estandarizada del Centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica para el cálculo de ese parámetro. La prueba consiste en calcular el porcentaje de germinación de semillas de pepino (*Cucumis sativus* L.) que son expuestas a diferentes proporciones de suelo:abono por un periodo de 7 días en condiciones de laboratorio. El ensayo utiliza el pepino como especie indicadora debido a la alta sensibilidad de esta planta a sustancias tóxicas presentes en el sustrato de germinación (Wang & Keturi, 1990). La

prueba emplea 15 repeticiones distribuidas en 5 concentraciones de abono y suelo (0:100, 25:75, 50:50, 75:25, 100:0) para cada muestra de compost. Se considera que el compost presenta un estado óptimo de madurez cuando el porcentaje de germinación promedio del grupo es mayor o igual a 80% (BSI, 2011). Los análisis fueron hechos utilizando las mismas muestras recolectadas para los análisis microbiológicos.

### 3.2.4 FITOTOXICIDAD

Se llevó a cabo un ensayo de germinación y crecimiento con semillas de pepino (*Cucumis sativus* L.), el cual tuvo como objetivo evaluar la fitotoxicidad del MM y LDBIO como agentes optimizadores del compost. El ensayo fue realizado en el Laboratorio de Microbiología Agrícola del Centro para Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica. Se utilizó el pepino como especie indicadora debido a la alta sensibilidad de esta planta a sustancias tóxicas presentes en el sustrato de germinación (Wang *et al.*, 1990). Para el ensayo se empleó un diseño experimental de bloques completos al azar con 6 tratamientos (Cuadro 2) y 6 repeticiones por tratamiento, n= 90 semillas por tratamiento.

Cuadro 2. Composición de los tratamientos elaborados para evaluar la fitotoxicidad del compost. Monteverde, Costa Rica. 2016-2017.

Tratamiento	Nombre	Categoría	Descripción del tratamiento (volumen)
T1	COPURO	Control	Mezcla de 33% COPURO+67% Suelo
T2	COMMR	Experimental	Mezcla de 33% COMMR +67% Suelo
T3	COMMP	Experimental	Mezcla de 33% COMMP +67% Suelo
T4	COLDB	Experimental	Mezcla de 33% COLDB +67% Suelo
T5	COMMLDBA	Experimental	Mezcla de 33% COMMLDBA +67% Suelo
T6	COMMLDBB	Experimental	Mezcla 33% COMMLDBB +67% Suelo

Las semillas de pepino fueron colocadas en platos petri con una mezcla de 67% del volumen de suelo tamizado y 33% de compost según cada tratamiento. A cada plato se le aplicó 5 ml de agua destilada con una bomba de aspersion manual para favorecer la

germinación. Los platos fueron forrados con papel craft y colocados en un espacio oscuro a temperatura ambiente por 7 días. Al séptimo día, los platos fueron abiertos en el mismo orden en que fueron guardados. A cada semilla se le registró la longitud total de la raíz y del tallo en cm con una regla milimétrica y el peso fresco total con una balanza electrónica calibrada a 0.00 gramos.

Los datos de germinación y crecimiento fueron incorporados en una matriz de Excel, y ordenados según el tipo de tratamiento, a partir de los cuales se calculó el Porcentaje Relativo de Semillas Germinadas (PRSG%), el Crecimiento Relativo Radicular (CRR%), el Índice de Germinación (IG%) y el Índice de Crecimiento (IC%), utilizando el método adaptado de Pampuro *et al.* (2017) de la siguiente forma:

PRSG (%):  $(n \text{ de semillas germinadas en compost experimental} / n \text{ de semillas germinadas en control}) \times 100$

CRR (%):  $(\text{promedio longitud radicular en compost experimental} / \text{promedio longitud radicular en control}) \times 100$

IG (%):  $(\text{PRSG} \times \text{CRR}) / 100$

IC (%):  $(\text{peso promedio en compost experimental} / \text{peso promedio en control}) \times 100$

### *Análisis estadísticos*

Se utilizaron las pruebas Kruskal-Wallis y Wilcoxon para identificar las diferencias entre los tratamientos experimentales y el control con respecto PRSG (%), CRR (%), IG (%) y IC (%). Ambos análisis fueron realizados con el software analítico R versión 3.4.1 (R Core Team, 2018).

## 3.3 OBJETIVO ESPECÍFICO 3: VALORAR EL EFECTO DEL COMPOST PRODUCIDO SOBRE EL DESARROLLO DE ALMÁCIGOS DE CAFÉ.

### 3.3.1 Diseño experimental

Con el fin de evaluar en condiciones de campo el efecto del compost producido sobre el desarrollo de almácigos de café, se estableció un experimento puro con 7 tratamientos de fertilización y 1 control siguiendo un arreglo de bloques completos al azar con 8 repeticiones por tratamiento y un  $n=200$  plántulas/tratamiento aleatorizadas (Figura 1) (Cuadro 3) siguiendo las metodologías descritas en FAO (1999) y Hernández Sampieri *et al.* (2010).

Las hipótesis nulas del ensayo fueron las siguientes:

H<sub>0</sub>(1): comprobar la igualdad de promedios de peso seco (g) entre el almácigo expuesto al control sin fertilización y al almácigo fertilizado con los diferentes tipos de compost experimentales, para determinar el efecto del compost sobre el crecimiento del almácigo a nivel general.

H<sub>0</sub>(2): comprobar la igualdad de promedios de peso seco (g) entre el almácigo expuesto al sistema de fertilización con vermicompost+NPK, y el almácigo fertilizado con los compost experimentales, esto con el objetivo de comparar el efecto del compost enmendado con MM y LDBIO con respecto al sistema de fertilización convencional intensivo. Aunque desde el punto de vista filosófico resulte ilógico comparar los sistemas de base orgánica con el sistema que combina abono orgánico y sintético, lo cual podría verse como una comparación muy exigente y desproporcionada para la solución experimental, la tesis utiliza el supuesto que para que los productores consideren cambiar de paradigma, uno de los requisitos fundamentales es que haya al menos congruencia en los niveles de rendimiento, lo cual es el objetivo de hacer la comparación, precisamente para revelar el potencial del sistema experimental.

H<sub>0</sub>(3): comprobar la igualdad de promedios entre el peso seco (g) del almácigo expuesto al sistema de fertilización con compost puro (no optimizado) y el almácigo expuesto al sistema de fertilización orgánica con compost enmendado con MM y LDBIO, en sus diferentes configuraciones, esto con el objetivo de evaluar el efecto de los agentes optimizadores sobre el crecimiento del almácigo de café.

Cuando las plántulas germinaron, éstas fueron trasplantadas a bolsas de almácigo (unidad de crecimiento=UDC), las cuales fueron llenadas con una mezcla de 1:3 partes

de compost y suelo respectivamente de acuerdo al tratamiento asignado en la aleatorización. Cada plántula permaneció en la UDC por un periodo de 7 meses. Una vez terminado dicho periodo, fueron extraídas de las UDC, medidas, pesadas, secadas y posteriormente pesadas nuevamente para determinar el peso seco. Sobre esta variable se realizaron los análisis estadísticos, para determinar la existencia de diferencias significativas entre los promedios de crecimiento alcanzados de acuerdo a cada tratamiento.

Cuadro 3. Tratamientos para comprobar el efecto del compost sobre el desarrollo de almácigo de café. Monteverde, Costa Rica. 2017-2018.

T#	Nombre	Categoría	Descripción del tratamiento
			Mezcla suelo/abono en la Unidad de crecimiento
T1	TESTIGO	Control Sin fertilización	100% suelo. Horizonte A de suelo de la finca, tamizado.
T2	VERMI COMPOST +NPK	Control, Sistema de fertilización convencional más intensivo	67% suelo + 33% humus de lombriz de brosa de café + fertilizante sintético NPK (10:30:10) a razón de 2 g por plántula por mes según dosis utilizada localmente en Monteverde y recomendada por (ICAFE, 2013).
T3	COPURO	Experimental, Sistema de fertilización orgánica	67% suelo + 33% compost puro.
T4	COMMR	Experimental, Sistema de fertilización orgánica	67% suelo + 33% compost hecho con MMR.
T5	COMMP	Experimental, Sistema de fertilización orgánica	67% suelo + 33% compost hecho con MMP. P=Placebo, sin MM, para comprobar el efecto real de los MM del T4.
T6	COLDBIO	Experimental, Sistema de fertilización orgánica	67% suelo + 33% compost hecho con LDBIO.
T7	COMMLDBIOA	Experimental, Sistema de fertilización orgánica	67% suelo + 33% compost hecho con MMR+LDBIO.
T8	COMMLDBIOB	Experimental, Sistema de fertilización orgánica	67% suelo + 33% compost hecho con MM+LBIO, brosa de café.

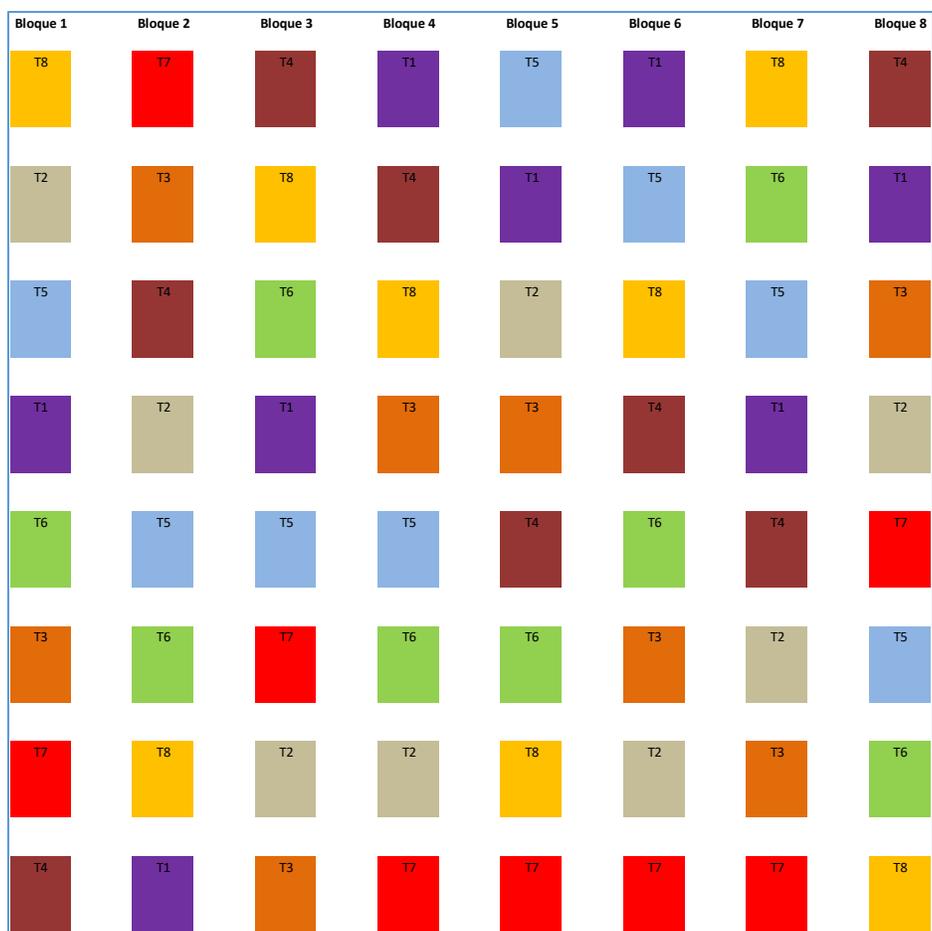


Figura 1. Distribución de los bloques completamente aleatorizados para el ensayo de crecimiento de almácigo de café sometidos a diferentes sistemas de fertilización con compost según metodología de FAO (1999).

### 3.3.2 Fases del experimento

#### Fase 1: Preparación del área del experimento

Consistió en la construcción del laboratorio de producción de compost y las camas de germinación, así como la adecuación del espacio donde se establecieron los bloques de crecimiento. Se construyeron 4 camas de germinación de 5 m<sup>2</sup> con arena. El área de crecimiento de las plántulas consistió en un espacio sin sombra de 300 m<sup>2</sup> (12 m x 25 m) adjunto al laboratorio de compost, el cual fue nivelado para la colocación de las unidades

de crecimiento según la distribución aleatorizada de los bloques. El área cuenta con una fuente de agua de manantial no clorada.

#### Fase 2: Recolección, secado y germinación de semillas

Consistió en la recolección, secado y germinación de semillas de café (*Coffea arabica* var. CR 95), lo cual se hizo siguiendo los procedimientos recomendados por Bustamante *et al.* (2009). La recolección de la semilla se llevó a cabo durante el pico de maduración de café en uno de los lotes de la marca local de Café San Luis ubicado en San Luis de Monteverde, la segunda semana de Diciembre del 2016. El despulpado y el secado se realizó en el centro de beneficiado de la misma marca de café siguiendo los procedimientos establecidos en la operación. La germinación se hizo en las camas de germinación establecidas para tal propósito en el vivero agroforestal de la Universidad de Georgia. El periodo de germinación y crecimiento inicial fue de 60 días donde las plántulas alcanzaron una altura aproximada de 8 cm.

#### Fase 3: Trasplante de plántulas a los bloques de crecimiento

Las plántulas fueron trasplantadas cuidadosamente a las unidades de crecimiento siguiendo los procedimientos indicados por Bustamante *et al.* (2009). Cada plántula fue numerada de acuerdo al tratamiento (p.ej. B2T1P122) y fueron colocadas en los bloques correspondientes. Se llevó a cabo una caracterización química y microbiológica de los suelos enmendados con compost al inicio del periodo de crecimiento. Estos consistieron en la determinación de los contenidos totales de Ca, Mg, K, P, Zn, Cu, Fe y Mn, así como en el cálculo de los valores de pH, acidez y capacidad de intercambio catiónico efectiva, según la metodología descrita en Soil Science Society of America (1996) y Días Romeu & Hunter (1978) utilizando la solución extractora KCL-Olsen modificado.

#### Fase 4: Monitoreo sobre el desarrollo de las plántulas

Consistió en llevar a cabo el mantenimiento y monitoreo del almácigo durante el periodo de crecimiento. El mantenimiento se hizo de acuerdo a las recomendaciones de Bustamante *et al.* (2009), el cual consistió en la aplicación de riego diario durante los

meses de temporada seca (Marzo-Abril) y la remoción de plantas competidoras. El monitoreo consistió en la inspección periódica del crecimiento y el estado fitosanitario de las plántulas.

#### Fase 5: Recolecta y procesamiento de datos

Para cumplir con el objetivo de determinar el efecto del compost enmendado con MM y LDBIO sobre el desarrollo del almácigo de café se procedió a medir la biomasa (peso seco en g) y el estado fitosanitario de cada una de las plántulas del experimento. Para la determinación de la biomasa, se utilizaron los procedimientos modificados de West (2015) y Rüginitz *et al.* (2009), en donde cada plántula fue extraída de la UDC y llevada al laboratorio para ser medida y pesada inmediatamente (peso húmedo). De inmediato, las plantas fueron secadas en un horno industrial a una temperatura constante de 50 °C por un periodo efectivo de 10 horas, tiempo en que demoraron las muestras tomadas en estabilizar el peso seco. Inmediatamente después, se determinaron los pesos secos de las hojas, la parte leñosa (tallo y bandolas), y las raíces con una balanza electrónica calibrada a 0.1 g.

El estado fitosanitario fue valorado durante el proceso de extracción de los cafetos de las UDC, para lo que se utilizó la escala:

- 1: Muy saludable (criterios: vitalidad óptima, crecimiento óptimo, follaje frondoso color verde oscuro intenso, no presenta signos visibles de plagas o enfermedades que puedan comprometer el desarrollo futuro de la planta).
- 2: Saludable (vitalidad aceptable, crecimiento aceptable, follaje frondoso mayormente verde, presenta signos visibles leves de plagas o enfermedades que puedan comprometer el desarrollo futuro de la planta).
- 3: Intermedio (vitalidad intermedia, crecimiento intermedio, follaje entre verde y amarillento, presenta signos visibles de plagas o enfermedades que puedan comprometer el desarrollo futuro de la planta).
- 4: Poco saludable (criterios: vitalidad baja, crecimiento deficiente, follaje amarillento, presenta signos fuertes de plagas o enfermedades que puedan comprometer el desarrollo futuro de la planta).

5: No saludable (criterios: sin vitalidad, crecimiento muy deficiente, follaje amarillento, presenta signos muy fuertes de plagas o enfermedades que puedan comprometer el desarrollo futuro de la planta).

6: Muerto.

El estado de infestación de roya y ojo de gallo se evaluó utilizando la escala:

0: ausente:

1: <10% del área foliar infectada.

2: 10-25% del área foliar infectada.

3: 25-50% del área foliar infectada.

4: 50-75% del área foliar infectada.

5: >75% del área foliar infectada.

Se realizaron análisis de tejidos foliares para la determinación de N, P, K, S, Ca, Mg, Fe, Cu, Zn, Mn, y B utilizando la metodología de digestión de tejidos descritas en Garfield *et al.* (2000) y Kalra (1998).

Las variables fueron registradas en una matriz de Excel, ordenadas de acuerdo a cada tratamiento, revisadas para asegurar la limpieza de observaciones atípicas y exportadas al formato .txt para su respectivo análisis en el programa R (R Core Team, 2018).

Todos los costos de producción (insumos [kg], transporte [¢], tiempo [hr]) fueron registrados a lo largo del experimento y monetizados de acuerdo al valor actual neto con el fin de determinar el nivel de inversión que requiere la elaboración y aplicación de cada tipo de tratamiento. Estos fueron incorporados en una matriz de Excel para el cálculo de la relación costo beneficio de cada tipo de compost elaborado.

## Fase 6: Análisis estadísticos e interpretación de resultados

### 6.1 Peso seco total, radicular, leñoso y foliar

El peso seco promedio en gramos fue utilizado como la variable de respuesta del análisis para caracterizar el efecto de los tratamientos sobre el desarrollo del almácigo de café. Esto por cuanto el peso seco es la métrica más confiable para contabilizar el crecimiento

de las plantas a través de los procesos metabólicos (West, 2015) y representa una variable que intuitiva y tradicionalmente ha sido empleada para determinar el efecto de diferentes tratamientos de fertilización en cultivos (Ercoli *et al.*, 1999; Adegbidi *et al.*, 2003; Mantovi *et al.*, 2005; Petisco *et al.*, 2008; Casierra-Posada *et al.*, 2011; Lok & Suárez, 2014; Sevel *et al.*, 2014).

La variable de respuesta fue registrada de acuerdo a los diferentes segmentos de las plántulas para determinar el peso seco total, radicular, de la parte leñosa (ramas y ramitas) y foliar (variables tomadas en gramos). Los datos fueron tabulados y exportados para ser procesados con el software analítico R versión 3.4.1 (R Core Team, 2018). Para cada una de esas variables se calcularon los promedios aritméticos, así como las desviaciones estándar, los errores estándar y la varianza. Los promedios fueron graficados utilizando la función de gráficos de barra. Las diferencias de peso seco (g) entre los tratamientos fueron evaluadas utilizando análisis de varianza de una vía, luego de verificar el cumplimiento de supuestos para estadística paramétrica utilizando las herramientas gráficas de R (gráficos QQ-Norm para verificar normalidad en la distribución de los residuos, y gráfico de valores ajustados contra los residuos para verificar la homocedasticidad). Para cada diferencia se calcularon los intervalos de confianza simultáneos (ICS) con la corrección de Bonferroni (Armstrong, 2014).

La significancia estadística entre cada una de las comparaciones entre tratamientos específicos fue evaluada utilizando pruebas de t (t-test). El p crítico fue ajustado con la corrección de Bonferroni (Armstrong, 2014) para efectos de minimizar la probabilidad de cometer errores tipo I (falsos positivos), lo cual es un riesgo que aumenta cuando se hacen múltiples comparaciones. El p crítico ajustado con dicha corrección se calculó dividiendo el alfa ( $\alpha=0.05$ ) entre el número de comparaciones por realizar, de tal forma que si el número de comparaciones son 7, se dividió  $0.05/7$ , lo cual ajusta el p crítico a 0.0071. Esto indica que la zona de rechazo de la  $H_0$  pasa de ser  $p<0.05$  a  $p<0.0071$ .

La relevancia práctica de cada comparación de promedios fue evaluada utilizando el criterio práctico de que las diferencias entre los tratamientos son relevantes cuando, en el caso del peso seco total, es  $>5$  g. Las diferencias menores a 5 g, no son perceptibles a simple vista en el campo, por lo que se considera, desde un punto de vista práctico, no

relevantes. En el caso del peso seco de la raíz es relevante cuando las diferencias son > 1.45 g, en la parte leñosa >1.20 g y en la biomasa foliar >2.35 g. Estos parámetros representan el 29, 24 y 48% de la diferencia de peso seco (5 g) para la raíz, la parte leñosa y el follaje de los cafetos respectivamente, los cuales provienen de la distribución promedio de peso según cada parte de los cafetos de los datos obtenidos en el ensayo.

#### Estado fitosanitario

Tomando como base que las plántulas que podrían utilizarse para establecer una plantación de café serían solamente las que presentan un estado fitosanitario intermedio, saludable y muy saludable (estado fitosanitario 3, 2 y 1 respectivamente), lo cual discrimina del sistema de producción a todas aquellas plántulas que tengan valores >3, se ajustó un modelo logístico para calcular la razón de propensión (OR, odds ratio por sus siglas en inglés) de los tratamientos experimentales contra el tratamiento T2 (que es el más intensivo) de producir plantas con las características suficientes para ser excluidas por mala calidad fitosanitaria, empleando la siguiente fórmula en lenguaje R versión 3.4.1-win (R Core Team, 2018).

$$OR = \frac{(\pi_{j \neq T2} \div 1 - \pi_{j \neq T2})}{(\pi_{j = T2} \div 1 - \pi_{j = T2})} = \frac{e^{B_0 + B_j}}{e^{B_0 + B_2 = 0}} = e^{B_j}$$

Donde,

OR= Razón de propensión de producir plántulas enfermas, con estado fitosanitario >3.

$(\pi_{j \neq T2} / 1 - \pi_{j \neq T2})$  = Propensión de producir plántulas enfermas

$(\pi_{j = T2} / 1 - \pi_{j = T2})$  = Propensión de producir plántulas sanas

$B_j$ = Coeficiente de propensión de producir plántulas enfermas del modelo logístico.

Los tratamientos con una mayor propensión a generar plantas con características fitosanitarias no idóneas que serían excluidas del sistema productivo, serán las que presentan los OR más altos.

#### Análisis económico

Los costos de producción de cada uno de los tratamientos, incluyendo materiales, transporte y mano de obra fueron registrados en una matriz utilizando una hoja de cálculo de Microsoft Excel. Se utilizó datos del ICAFE (2017) para el cálculo de la relación costo beneficio de cada tratamiento dividiendo el costo de producción total entre el valor del almácigo comercial. Dicha relación fue utilizada para comparar la eficiencia económica de cada tratamiento.

### 3.3.3 Técnicas e instrumentos

Las técnicas e instrumentos empleados en la investigación están descritas en las respectivas fases del ensayo. En el Cuadro 4 se presenta un resumen de las mismas.

Cuadro 4. Técnicas e instrumentos de investigación para el ensayo de crecimiento de almácigo de café sometidos a diferentes sistemas de fertilización con compost. Monteverde, Costa Rica. 2017-2018.

Fase	Técnicas	Instrumentos/Materiales
Fase 1: preparación del área del experimento	Construcción del laboratorio para producción de compost. Preparación de terreno	Materiales de construcción. Herramientas para limpieza y nivelado del terreno
Fase 2: Recolección, secado y germinación de semillas	Recolección, secado y germinación de semillas de café según procedimientos recomendados por (Bustamante <i>et al.</i> , 2009).	Camas de germinación construidas en el campus
Fase 3: Trasplante de plántulas a los bloques de crecimiento	Trasplante según recomendaciones de Bustamante <i>et al.</i> (2009). Asignación de plántulas a tratamiento según aleatorización de Hernández Sampieri <i>et al.</i> (2010).	Bolsas para almácigo de café de 20 cm x 10 cm. Placas de aluminio para el marcado de las plántulas.
Fase 4: Monitoreo sobre el desarrollo de las plántulas	Mantenimiento y control según las recomendaciones de Bustamante <i>et al.</i> (2009). Monitoreo del desarrollo.	Accesorios para riego manual. Reglas y balanzas manuales.
Fase 5: Recolecta y procesamiento de datos	Determinación de peso húmedo y seco en laboratorio con balanza electrónica (Rügnitz <i>et al.</i> , 2009; West, 2015).	Balanza electrónica. Regla. Invernadero, horno de secado y laboratorio climatizado.
Fase 6: Análisis estadísticos e interpretación de resultados	Diferencias de peso seco (g) entre tratamientos. ANOVA. T-test. Intervalos de confianza. Corrección de Bonferroni.	Computadora portátil. Excel y programa estadístico R

### 3.3.4 Definición de variables

Se comparó el peso seco en gramos de las plántulas de café una vez cumplido el ciclo de crecimiento entre los tratamientos. También se evaluó el estado fitosanitario utilizando una escala ordinal de 1 a 6.

Las variables para el análisis de costos fueron la cantidad de insumos (kg) necesarios para desarrollar y poner a prueba los diferentes tratamientos, el tiempo (hr) para la elaboración y mantenimiento del ensayo y los costos de transporte en colones. Las variables no monetarias fueron transformadas a costos totales en colones (¢) para determinar la relación de costo beneficio de cada tratamiento.

## CAPITULO IV: RESULTADOS

### 4.1 OBJETIVO ESPECÍFICO 1: DISEÑAR UN SISTEMA DE BIOFERTILIZACIÓN ORGÁNICA CON COMPOST PRODUCIDO A PARTIR DE RESIDUOS BIOMÁSICOS LOCALES, MM Y LDBIO

Los seis tipos de compost elaborados experimentaron las tres etapas teóricas del compostaje durante el proceso de producción: mesófila, termófila y mesófila 2 (Figura 2). El tiempo aproximado de estabilización fue de 70 días para los seis tipos de compost producidos. A partir de ese periodo, los compost entraron en un lapso de maduración, el cual tuvo una duración aproximada de 75 días, tiempo en el que las variables monitoreadas mostraron un comportamiento estable (Figuras 3-6).

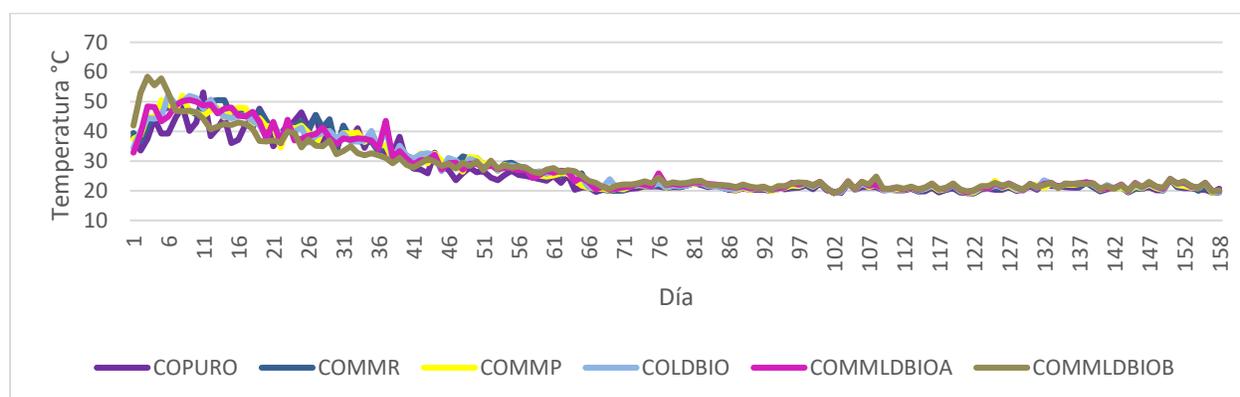


Figura 2. Variación de la temperatura en grados centígrados (°C) de las pilas de compost. 2016-2017. Morado (compost puro), azul (compost con MMR), amarillo (compost con MMP), celeste (compost con LDBIO), magenta (compost con MMR y LDBIO A), café (compost con MMR y LDBIO B).

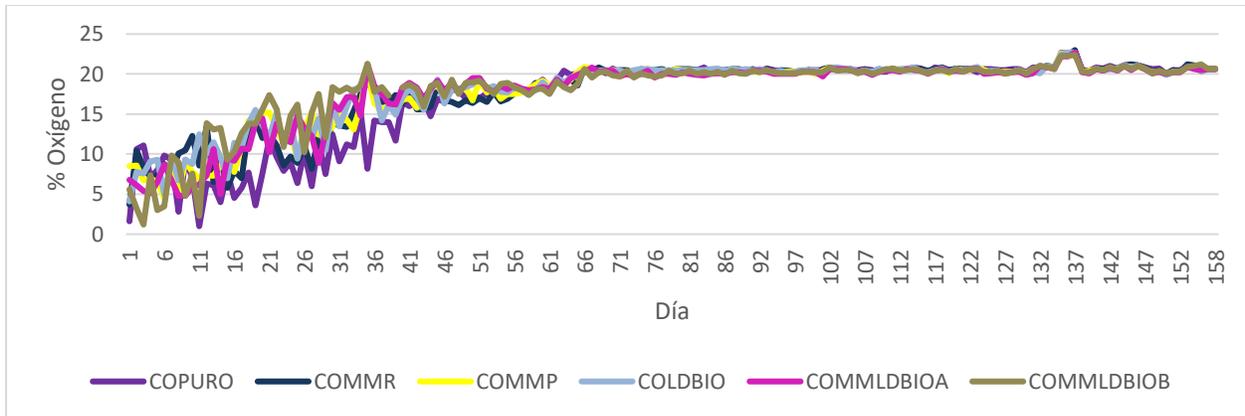


Figura 3. Variación de la saturación de oxígeno (%) de las pilas de compost. 2016-2017. Morado (compost puro), azul (compost con MMR), amarillo (compost con MMP), celeste (compost con LDBIO), magenta (compost con MMR y LDBIO A), café (compost con MMR y LDBIO B).

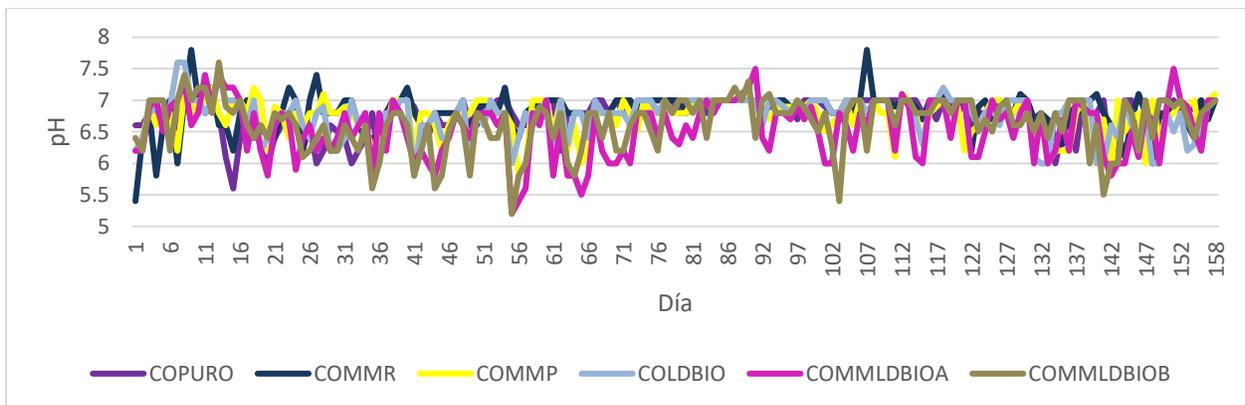


Figura 4. Variación en el pH de las pilas de compost. 2016-2017. Morado (compost puro), azul (compost con MMR), amarillo (compost con MMP), celeste (compost con LDBIO), magenta (compost con MMR y LDBIO A), café (compost con MMR y LDBIO B).

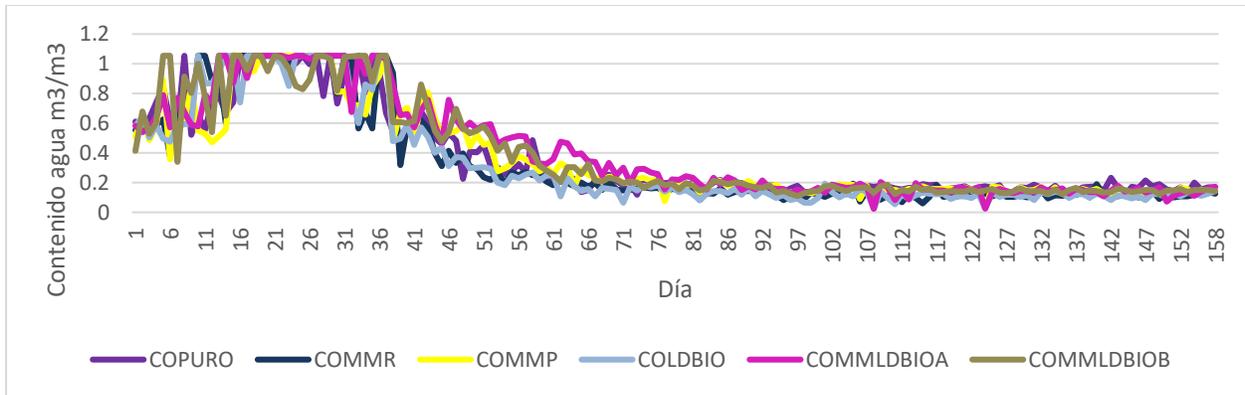


Figura 5. Variación del contenido de agua ( $m^3/m^3$ ) de las pilas de compost. 2016-2017. Morado (compost puro), azul (compost con MMR), amarillo (compost con MMP), celeste (compost con LDBIO), magenta (compost con MMR y LDBIO A), café (compost con MMR y LDBIO B).

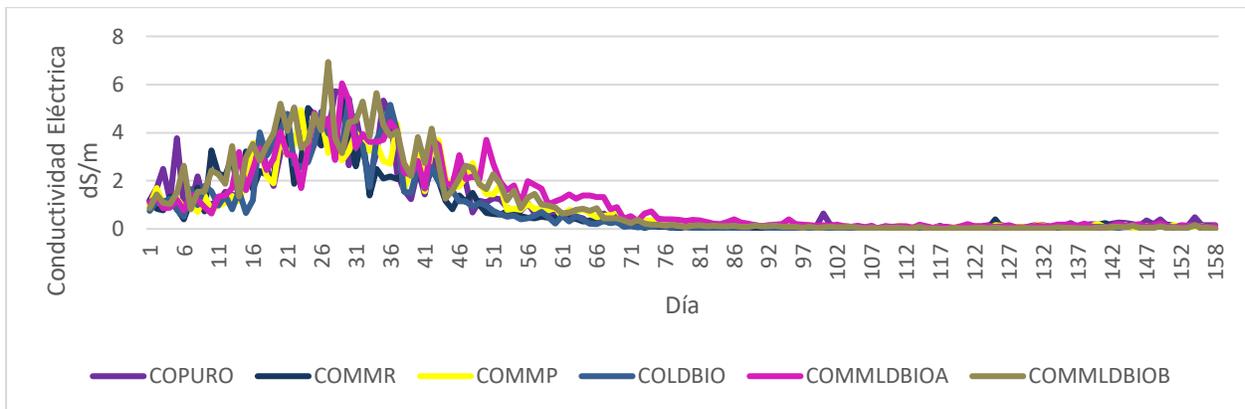


Figura 6. Variación de la conductividad eléctrica (dS/m) de las pilas de compost. 2016-2017. Morado (compost puro), azul (compost con MMR), amarillo (compost con MMP), celeste (compost con LDBIO), magenta (compost con MMR y LDBIO A), café (compost con MMR y LDBIO B).

#### 4.2 OBJETIVO ESPECÍFICO 2: EVALUAR LOS PARÁMETROS DE CALIDAD DEL COMPOST ELABORADO.

#### 4.2.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS MM Y LDBIO

Los análisis revelan que los LDBIO contienen una cantidad importante de nutrientes, materia orgánica y humedad (Cuadro 5), mientras que los MM solo presentan un bajo contenido de sustancias nutritivas. Los tres tipos de materiales son inocuos y presentan una concentración abundante de microorganismos.

Cuadro 5. Caracterización química y microbiológica de una muestra homogenizada de MM Y LDBIO. Monteverde, Costa Rica. 2017.

Estado →	LIQUIDO	LIQUIDO	SOLIDO
Análisis	MMR	MMP	LDBIO
N%	0.03	0.05	2.75
P%	0.03	0.05	0.64
K%	0.16	0.019	0.27
Ca%	0.05	0.05	1.57
Mg%	0.09	0.04	0.30
S%	0.05	0.05	0.94
Fe (mg.kg-1)	17	11	23144
Cu (mg.kg-1)	<1	<1	205
Zn (mg.kg-1)	2	2	1129
Mn (mg.kg-1)	3	4	447
B (mg.kg-1)	1	1	10
pH	3.4	3.4	6.2
Porcentaje de humedad %	NA	NA	90
Conductividad Eléctrica CE (mS/cm)	7.2	8.0	6.6
Carbono C (%)	NA	NA	26.59
Materia Orgánica MO%	NA	NA	38.02
Relación C/N	NA	NA	9.7
Inocuidad ( <i>E. coli</i> NMP/100g)	<10	<10	<10
Bacterias UFC/g	2.9X10 <sup>6</sup>	2.5x10 <sup>6</sup>	1.9x10 <sup>7</sup>
Hongos UFC/g	7.1X10 <sup>4</sup>	1.9X10 <sup>5</sup>	1.0X10 <sup>4</sup>
Actinomicetos UFC/g	7.0x10 <sup>4</sup>	8.0X10 <sup>4</sup>	3.0X10 <sup>4</sup>
Densidad g/mL	1.02	1.02	NA

#### 4.2.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS COMPOST PUROS

Los análisis revelaron que el compost que combina MM y LDBIO (COMMR LDBIOA) es el que presenta las mejores características en cuanto a la concentración de macronutrientes (NPK y S), contenido de humedad (H%), materia orgánica (MO%) y carbono (C%) (Cuadro 6). En este abono, el pH tiende a ser levemente básico, mientras que la relación C/N se mantiene estable. El mismo presenta un rango alto de conductividad eléctrica (CE), lo cual indica la presencia de sales minerales en el compuesto. No se detectó que haya un aporte importante de micronutrientes, a excepción de Cu y Zn, por parte de los MM y LDBIO en el compost terminado. Todos los abonos alcanzaron rangos óptimos de estabilidad, madurez e inocuidad y el contenido de biomasa microbiana fue mayor en los abonos que contienen solo MM.

Cuadro 6. Caracterización química y microbiológica de una muestra homogenizada de los compost elaborados con MM y LDBIO. Monteverde, Costa Rica. 2017.

Análisis	COPURO	COMMR	COMMP	COLDBIO	COMMR LDBIOA	COMMR LDBIOB
N% -(0.3-1.5%) FAO (2013c)	1.75	1.8	1.71	1.85	1.93*	1.62
P% -(0.1-1.0%) FAO (2013c)	0.24	0.27	0.3	0.29	0.34	0.26
K% -(0.3-1%) FAO (2013c)	1.38	1.88	1.68	1.77	1.92*	1.65
Ca%	1.58	1.66	1.51	1.69	1.53	1.61
Mg%	0.38	0.41	0.39	0.36	0.38	0.39
S% (0.3%) Stoffella & Kahn (2001)	0.17	0.19	0.19	0.24	0.27	0.22
Fe (mg.kg-1)	20,772	19,939	37,327	19,077	16,984	18,968
Cu (mg.kg-1) (976) Hsu & Lo (2001)	48	47	49	58	57	54
Zn (mg.kg-1) – (<25 mg.kg-1) Stoffella & Kahn (2001)	125	112	100	153	151	133
Mn (mg.kg-1)	677	634	702	687	640	709
B (mg.kg-1) –(<2.5 mg.kg-1) Stoffella & Kahn (2001)	12	12	11	13	10	15
pH- (7) FAO (2013c)	8.2	8.5	8.5	8.3	8.4	8.5
Porcentaje de humedad % -(30-40%) US Composting Council (2002)	34	29	37	35	41*	30
Conductividad Eléctrica CE (mS/cm) – (10 mS/cm) US Composting Council (2002)	8.3	10.3	8.9	9.9	10.3	8.3
Carbono C (%) -(~19%) Stoffella & Kahn (2001)	17.9	18.35	16.8	18.93	19.85	16.33

Continúa Cuadro 6						
Análisis	COPURO	COMMR	COMMP	COLDBIO	COMMR LDBIOA	COMMR LDBIOB
Materia Orgánica MO% - (>20%) FAO (2013c)	25.60	26.24	24.02	27.07	28.39*	23.35
Relación C/N -(10:1 15:1) FAO (2013c)	10.3	10.3	9.8	10.2	10.3	10.1
Estabilidad (mgCO <sub>2</sub> g <sup>-1</sup> SV-1 t <sup>-1</sup> ) - Respiración <6 mg CO <sub>2</sub> g <sup>-1</sup> Sólidos Volátiles-1 día-1 BSI (2011)	0.288	0.443	0.477	0.421	0.481	0.28
Madurez % -(≥80%) BSI (2011)	100	100	93	93	100	100
Biomasa microbiana (mgC/kg suelo) – (actinos/final) Antil & Raj (2012)	24	55	75	16	30	9
Inocuidad (E. coli NMP/100g) –(negativa) CIA (2017)	<10	<10	<10	<10	<10	<10
Calidad	Optima	Optima	Optima	Optima	Optima	Optima

Rojo: > del experimento, \*: > literatura

#### 4.2.3 EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE FITOTOXICIDAD

Las pruebas de Kruskal Wallis revelan que existen diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre todos los tratamientos para los índices calculados (PRSG%, CRR%, IG%, IC%) (ver Cuadro 7). Esto indica que no existe igualdad de promedios para esos índices entre los tratamientos, hecho que muestra que la adición de MM y LDBIO al compost puede afectar de manera positiva o negativa la germinación y el crecimiento inicial de las semillas de pepino (*Cucumis sativus* L.) expuestas a los diferentes tipos de abono.

##### 4.2.3.1 PORCENTAJE RELATIVO DE SEMILLAS GERMINADAS (PRSG%)

La prueba pareada de Wilcoxon revela que los porcentajes de germinación promedio de los tratamientos T2, T3 y T4 no difieren significativamente al control ( $p > 0.05$ ) (ver Figura 7). Mientras que el PRSG % promedio de los tratamientos T5 y T6 son significativamente menores al control ( $p < 0.05$ ). Esto indica que el empleo integrado de MM y LDBIO en las concentraciones utilizadas, tiene un efecto inhibitor en la germinación de las semillas de

pepino, y podría inferirse que el empleo integrado de estos compuestos podría tener un efecto fitotóxico sobre cultivos sensibles.

Cuadro 7. Promedios de los diferentes índices y estadísticos calculados para evaluar la fitotoxicidad del MM y LDBIO. Monteverde, Costa Rica. 2017. n=6 por tratamiento.

Tratamiento	PRSG %	CRR %	IG %	IC %
T1 COPURO	100.00 (a)	100.00 (a)	100.00 (a)	100.00 (a)
T2 COMMR	95.11 (a)	128.90 (b)	131.55 (a)	115.77 (a)
T3 COMMP	109.97 (a)	105.52 (a)	113.86 (a)	99.31 (a)
T4 COLDB	93.70 (a)	102.24 (a)	106.53 (a)	84.18 (a)
T5 COMMRLDBA	57.98 (b)	45.00 (b)	28.69 (b)	44.21 (b)
T6 COMMRLDBB	65.12 (b)	77.35 (b)	53.25 (b)	57.96 (b)
Kruskal-Wallis chi-square	14.4	16.24	16.42	11.47
Valor de p Kruskal-Wallis	0.013	0.006	0.005	0.04
Valoración del promedio	NA	Ψ	F	€

Resultados de la prueba pareada de Wilcoxon: (a) Tx= control ( $p>0.05$ ), (b) Tx  $\neq$  control ( $p<0.05$ ).  $\Psi >100\%$  = existe efecto estimulador del crecimiento radicular (Pampuro *et al.*, 2017).  $F >80\%$  = compost libre de fitotoxinas (Zucconi, 1981).  $\text{€} > 100\%$  = compost libre de fitotoxinas (Piemonte, 2000).

#### 4.2.3.2 CRECIMIENTO RELATIVO RADICULAR (CRR%)

La prueba de Wilcoxon revela que el CCR % promedio del T2 (COMMR) es significativamente mayor al control ( $p<0.05$ ) (ver Figura 8), por lo que se podría inferir que la aplicación de compost tratado con MM tiene un efecto estimulador sobre crecimiento radicular (Pampuro *et al.*, 2017). El CCR % promedio de los tratamientos T3 y T4 no difieren con respecto al control ( $p>0.05$ ), mientras que el de los tratamientos T5 y T6 es significativamente menor al T1 ( $p<0.05$ ). Estos resultados aportan evidencia de que el empleo integrado de MM y LDBIO en las concentraciones utilizadas, tiene un efecto inhibitor en el desarrollo radicular del cultivo de prueba, y podría inferirse que el empleo integrado de estos compuestos podría tener un efecto fitotóxico sobre cultivos sensibles.

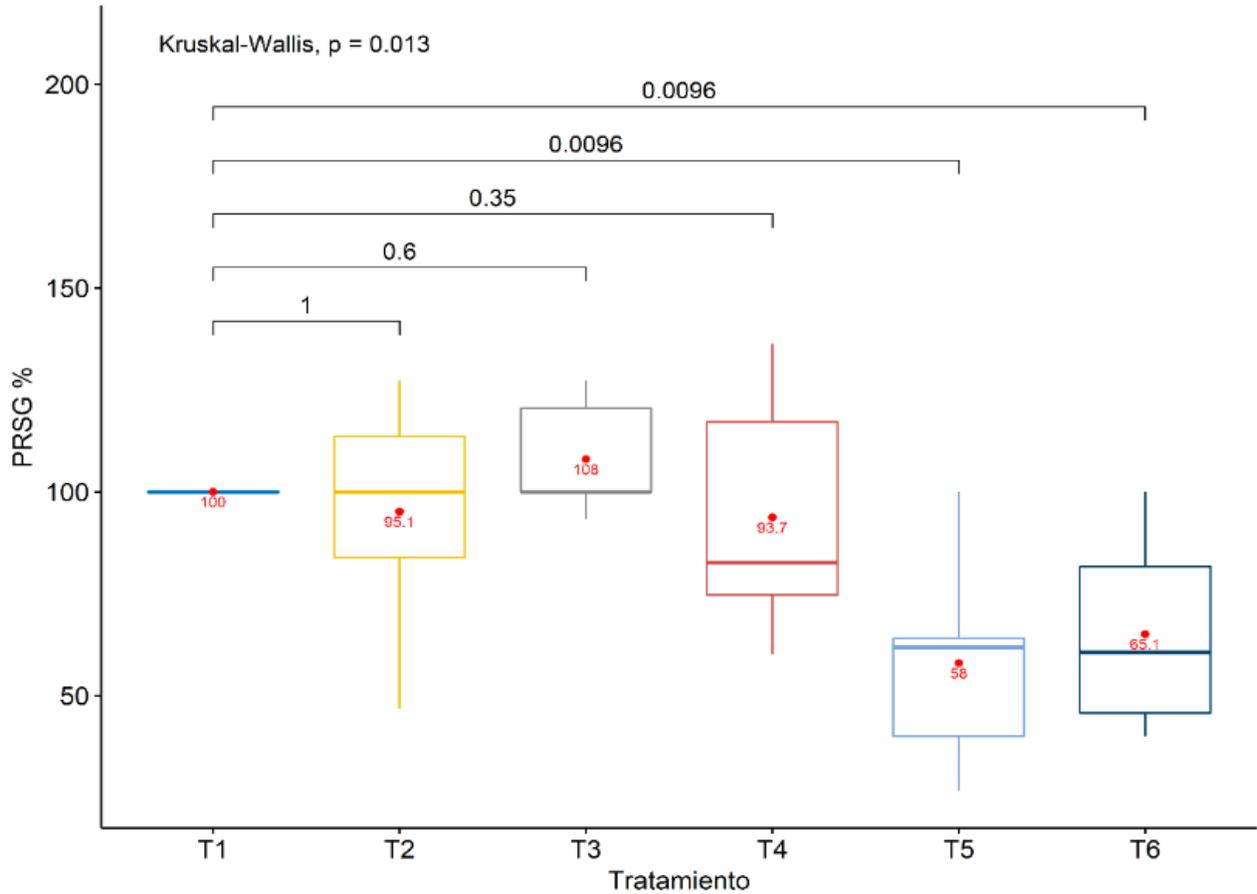


Figura 7. Porcentaje Relativo de Semillas Germinadas (PRSG%) de pepino (*Cucumis sativus* L.) expuestas a T1 compost puro, T2 compost con MMR, T3 compost con MMP, T4 compost con LDBIO, T5 compost con MMR y LDBIO A, T6 compost con MMR y LDBIO B. 2017. Las cajas representan el agrupamiento del 50% de los datos (segundo y tercer cuartil) y la línea interna, la mediana. La numeración en rojo muestra el PRSG % promedio para cada tratamiento. Las líneas horizontales indican el valor de p obtenido del test de Wilcoxon entre el tratamiento señalado y el control. Existen diferencias significativas entre el T5 y T6 con respecto al control ( $p < 0.05$ ). El empleo integrado de MM+LDBIO podría tener un efecto fitotóxico sobre cultivos sensibles.

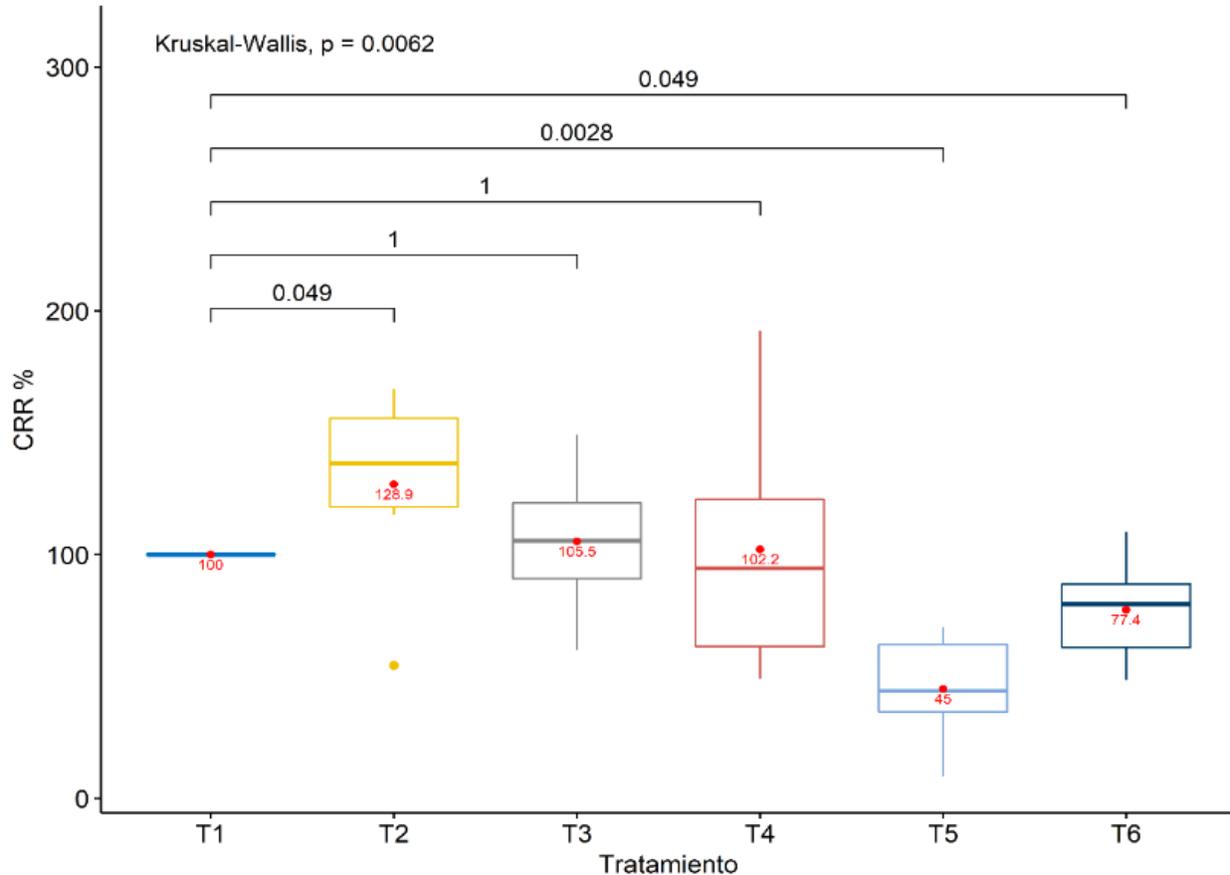


Figura 8. Crecimiento Relativo Radicular (CRR%) de semillas de pepino (*Cucumis sativus* L.) expuestas a T1 compost puro, T2 compost con MMR, T3 compost con MMP, T4 compost con LDBIO, T5 compost con MMR y LDBIO A, T6 compost con MMR y LDBIO B. 2017. Las cajas representan el agrupamiento del 50% de los datos (segundo y tercer cuartil) y la línea interna, la mediana. La numeración en rojo muestra el CRR % promedio para cada tratamiento. Las líneas horizontales indican el valor de p obtenido del test de Wilcoxon entre el tratamiento señalado y el control. Existen diferencias significativas entre el T2, T5 y T6 con respecto al control ( $p < 0.05$ ).

#### 4.2.3.3 ÍNDICE DE GERMINACIÓN (IG%)

La prueba de Wilcoxon revela que el IG % promedio de los tratamientos T2, T3 y T4 no difieren significativamente del control (T1) ( $p > 0.05$ ) (ver Figura 9). Estos tratamientos

presentan un IG % >80%, por lo que de acuerdo el criterio de Zucconi (1981), estos tres tipos de compost están libres de fitotoxinas. El IG % promedio de los tratamientos T5 y T6 es significativamente menor al control ( $p < 0.05$ ). Estos promedios son menores al límite de fitotoxicidad propuestos por Zucconi (1981), y aportan evidencia de que el empleo integrado de MM y LDBIO inhibe la germinación del cultivo de prueba, por lo que podría inferirse que la integración de estos dos compuestos podría generar efectos fitotóxicos en el compost maduro.

#### 4.2.3.4 ÍNDICE DE CRECIMIENTO (IC%)

La prueba de Wilcoxon revela que el IC % promedio de los tratamientos T2, T3 y T4 no difieren significativamente del control (T1) ( $p > 0.05$ ) (ver Figura 10). Estos tratamientos presentan IC % promedio cercanos al 100%, por lo que según el criterio de Piemonte (2000), estos tres tipos de compost están libres de fitotoxinas. El IC % promedio de los tratamientos T5 y T6 es significativamente menor al control ( $p < 0.05$ ). Estos promedios son menores al límite de fitotoxicidad propuestos por Piemonte (2000), y aportan evidencia de que el empleo integrado de MM y LDBIO compost inhibe el crecimiento del cultivo de prueba, por lo que podría inferirse que la integración de estos dos compuestos podría generar efectos fitotóxicos en el compost maduro.

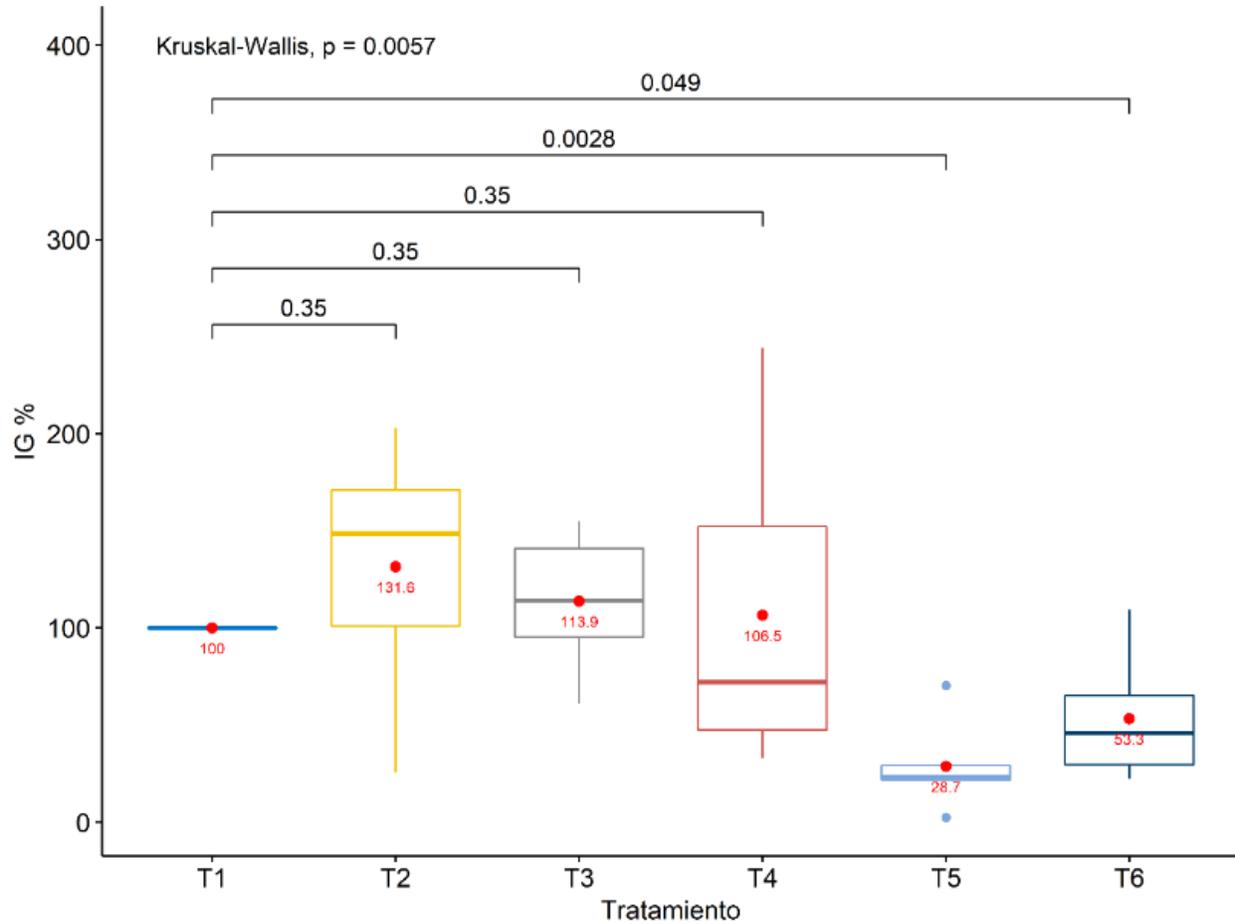


Figura 9. Índice de Germinación (IG%) de semillas de pepino (*Cucumis sativus* L.) expuestas a T1 compost puro, T2 compost con MMR, T3 compost con MMP, T4 compost con LDBIO, T5 compost con MMR y LDBIO A, T6 compost con MMR y LDBIO B. 2017. Las cajas representan el agrupamiento del 50% de los datos (segundo y tercer cuartil) y la línea interna, la mediana. La numeración en rojo muestra el IG % promedio para cada tratamiento. Las líneas horizontales indican el valor de p obtenido del test de Wilcoxon entre el tratamiento señalado y el control. Existen diferencias significativas entre el T5 y T6 con respecto al control ( $p < 0.05$ ). El empleo integrado de MM+LDBIO podría tener un efecto fitotóxico sobre cultivos sensibles.

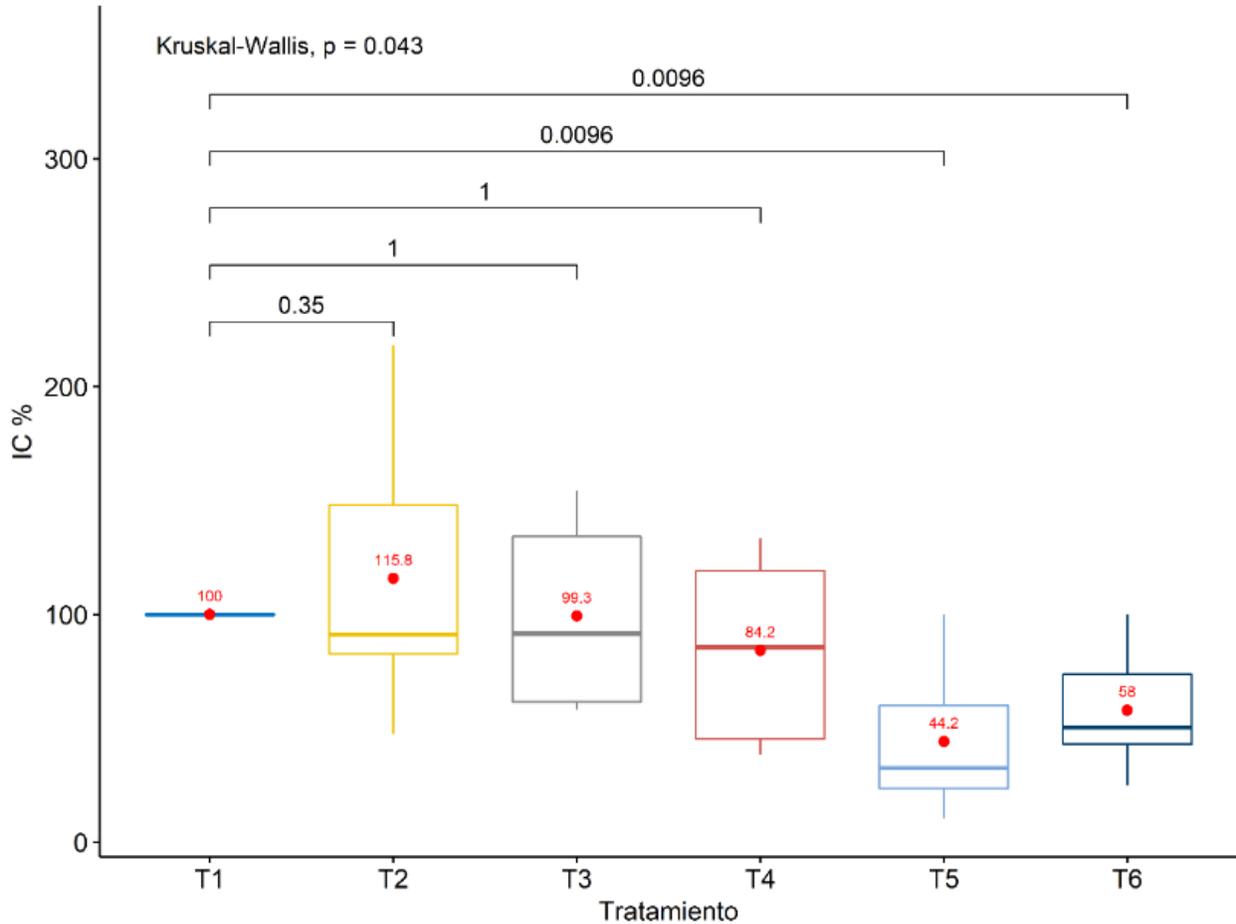


Figura 10. Índice de Crecimiento (IC%) de semillas de pepino (*Cucumis sativus* L.) expuestas a T1 compost puro, T2 compost con MMR, T3 compost con MMP, T4 compost con LDBIO, T5 compost con MMR y LDBIO A, T6 compost con MMR y LDBIO B. 2017. Las cajas representan el agrupamiento del 50% de los datos (segundo y tercer cuartil) y la línea interna, la mediana. La numeración en rojo muestra el IC % promedio para cada tratamiento. Las líneas horizontales indican el valor de p obtenido del test de Wilcoxon entre el tratamiento señalado y el control. Existen diferencias significativas entre el T5 y T6 con respecto al control ( $p < 0.05$ ). El empleo integrado de MM+LDBIO podría tener un efecto fitotóxico sobre cultivos sensibles.

#### 4.3 OBJETIVO ESPECÍFICO 3: VALORAR EL EFECTO DEL COMPOST PRODUCIDO SOBRE EL DESARROLLO DE ALMÁCIGOS DE CAFÉ.

#### 4.3.1 PESO SECO TOTAL, RADICULAR, LEÑOSO Y FOLIAR

Los análisis de los datos derivados del experimento de crecimiento con almácigo de café revelan que existen diferencias significativas entre los promedios de peso seco total (g) alcanzados por las plántulas expuestas a los diferentes tratamientos a un  $p < 0.05$  (ANOVA F-valor 124.64, p-valor  $2.2 \times 10^{-16}$ , ver Cuadro 8, Figura 11 y Anexo 3). Estas diferencias se aprecian claramente a nivel radicular (ANOVA F-valor 73.79, p-valor  $2.2 \times 10^{-16}$ ), leñoso (ANOVA F-valor 100.76, p-valor  $2.2 \times 10^{-16}$ ) y foliar (ANOVA F-valor 153.31, p-valor  $2.0 \times 10^{-16}$ ), ver Cuadro 9, Figuras 12, 13, 14 y Anexos 4, 5, 6.

Cuadro 8. Peso seco promedio (g) de las plántulas de café expuestas a los diferentes tipos de compost experimentales y controles. Monteverde, Costa Rica. 2018.

Tratamiento	Peso seco total promedio (g)	Desviación estándar (dispersión)	Error estándar de la media (precisión)	Varianza
T1 TESTIGO	4.74	2.35	0.17	5.50
T2 VERMICOMPOST+NPK	18.22	6.41	0.45	41.03
T3 COPURO	15.31	5.10	0.36	26.05
T4 COMMR	14.39	4.88	0.34	23.77
T5 COMMP	14.16	4.80	0.34	23.04
T6 COLDB	15.26	5.69	0.40	32.34
T7 COMMRLDBA	14.51	5.49	0.39	30.15
T8 COMMRLDBB	11.73	5.46	0.38	29.84

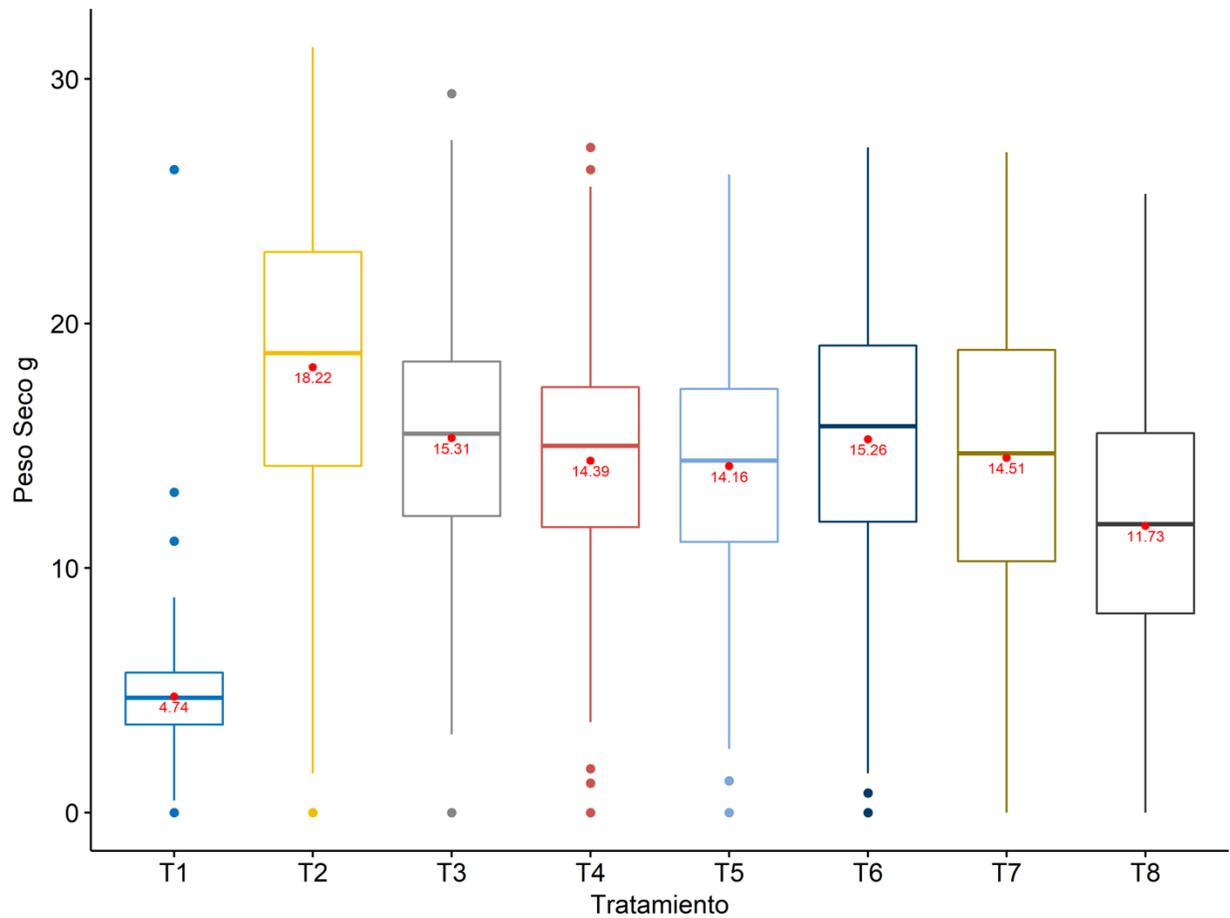


Figura 11. Peso seco promedio de las plántulas de café expuestas a los diferentes tipos de compost experimentales y controles. T1 suelo sin fertilizante, T2 humus de lombriz y NPK, T3 compost puro, T4 compost con MMR, T5 compost con MMP, T6 compost con LDBIO, T7 compost con MMR y LDBIO A y T8 compost con MMR y LDBIO B. 2018. Las cajas representan el agrupamiento del 50% de los datos (segundo y tercer cuartil) y la línea interna, la mediana. La numeración en rojo muestra el peso seco promedio obtenido en cada tratamiento. Existen diferencias significativas entre los tratamientos ( $p < 0.05$ ).

Cuadro 9. Peso seco promedio radicular, leñoso y foliar (g) de las plántulas de café expuestas a los diferentes tipos de compost experimentales y controles. Monteverde, Costa Rica. 2018.

Tratamiento	Peso seco promedio (g)	Desviación Estándar (dispersión)	Error estándar de la media (precisión)	Varianza
<b>Radicular</b>				
T1 TESTIGO	1.56	1.05	0.07	1.1
T2 VERMICOMPOST+NPK	4.70	2.03	0.14	4.13
T3 COPURO	4.64	1.83	0.13	3.35
T4 COMMR	4.21	1.72	0.12	2.96
T5 COMMP	4.38	1.87	0.13	3.5
T6 COLDB	4.47	1.97	0.14	3.89
T7 COMMRLDBA	4.18	1.98	0.14	3.92
T8 COMMRLDBB	3.07	1.7	0.12	2.89
<b>Leñoso</b>				
T1 TESTIGO	1.19	0.52	0.04	0.27
T2 VERMICOMPOST+NPK	4.24	1.57	0.11	2.46
T3 COPURO	3.75	1.51	0.11	2.28
T4 COMMR	3.30	1.22	0.09	1.5
T5 COMMP	3.29	1.23	0.09	1.52
T6 COLDB	3.56	1.37	0.1	1.89
T7 COMMRLDBA	3.46	1.4	0.1	1.96
T8 COMMRLDBB	2.77	1.36	0.09	1.86
<b>Foliar</b>				
T1 TESTIGO	1.99	1.06	0.08	1.13
T2 VERMICOMPOST+NPK	9.27	3.19	0.23	10.17
T3 COPURO	6.92	2.16	0.15	4.65
T4 COMMR	6.87	2.28	0.16	5.2
T5 COMMP	6.49	2.06	0.15	4.25
T6 COLDB	7.22	2.65	0.19	7.03
T7 COMMRLDBA	6.87	2.45	0.17	0.1
T8 COMMRLDBB	5.9	2.69	0.19	7.28

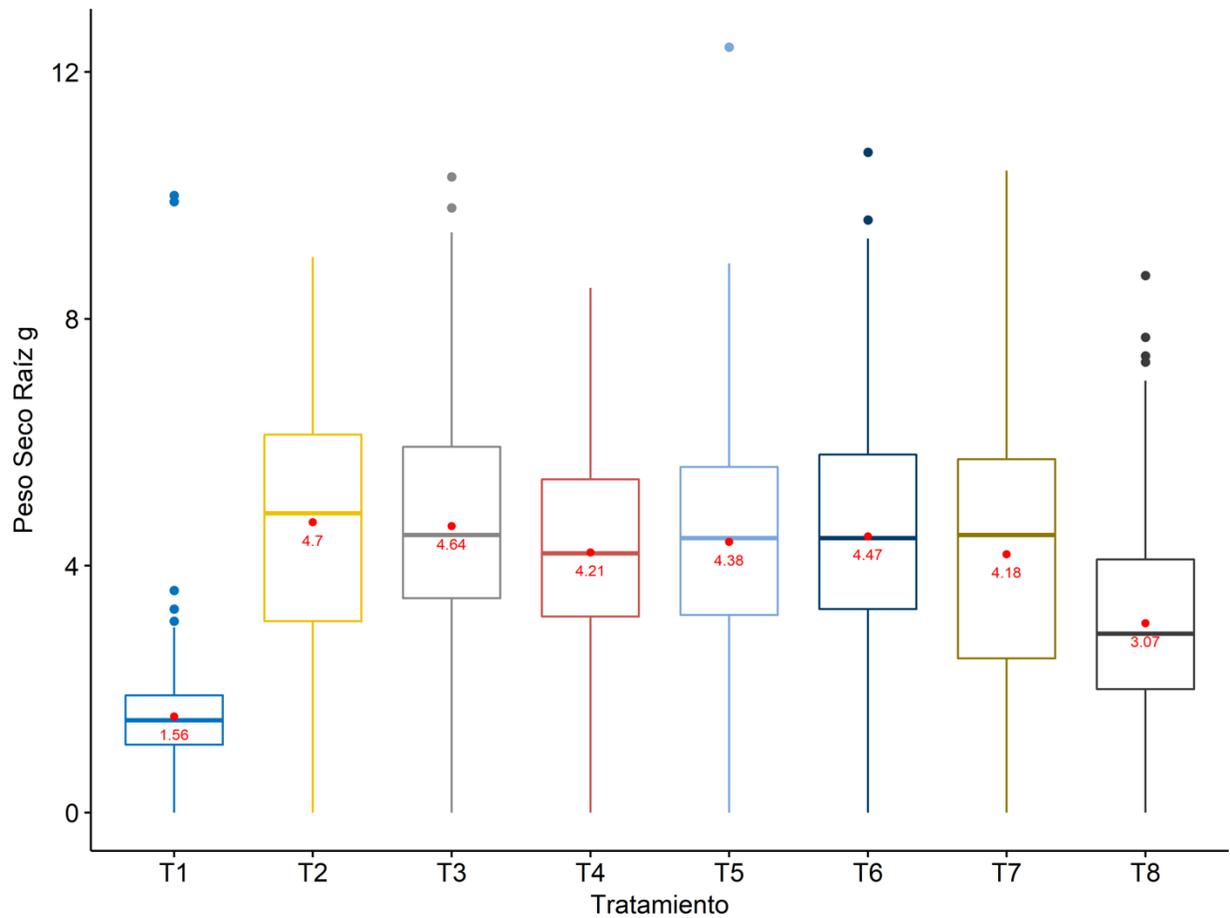


Figura 12. Peso seco radicular promedio de las plántulas de café expuestas a los diferentes tipos de compost experimentales y controles. T1 suelo sin fertilizante, T2 humus de lombriz y NPK, T3 compost puro, T4 compost con MMR, T5 compost con MMP, T6 compost con LDBIO, T7 compost con MMR y LDBIO A y T8 compost con MMR y LDBIO B. 2018. Las cajas representan el agrupamiento del 50% de los datos (segundo y tercer cuartil) y la línea interna, la mediana. La numeración en rojo muestra el peso seco promedio obtenido en cada tratamiento. Existen diferencias significativas entre los tratamientos ( $p < 0.05$ ).

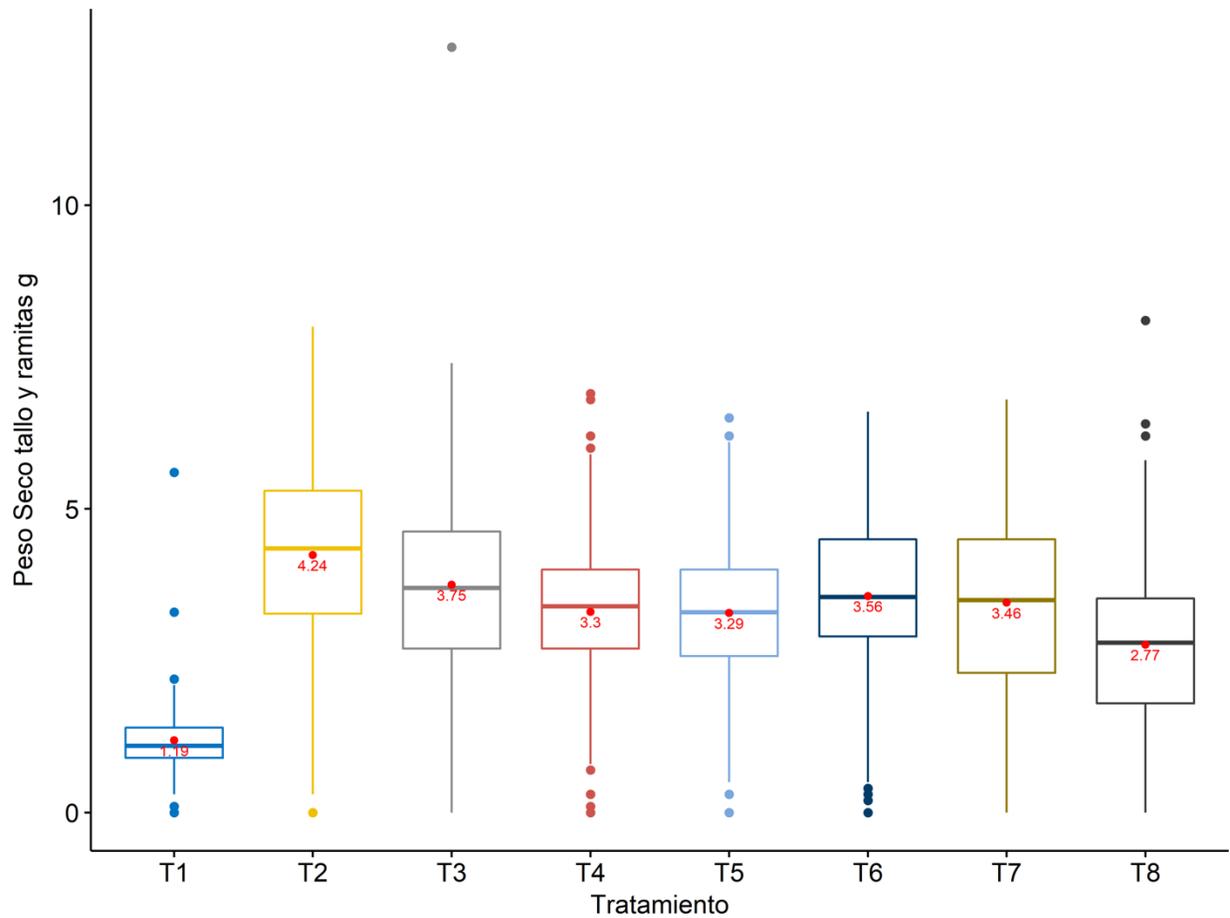


Figura 13. Peso seco promedio del tallo y ramitas de las plántulas de café expuestas a los diferentes tipos de compost experimentales y controles. T1 suelo sin fertilizante, T2 humus de lombriz y NPK, T3 compost puro, T4 compost con MMR, T5 compost con MMP, T6 compost con LDBIO, T7 compost con MMR y LDBIO A y T8 compost con MMR y LDBIO B. 2018. Las cajas representan el agrupamiento del 50% de los datos (segundo y tercer cuartil) y la línea interna, la mediana. La numeración en rojo muestra el peso seco promedio obtenido en cada tratamiento. Existen diferencias significativas entre los tratamientos ( $p < 0.05$ ).

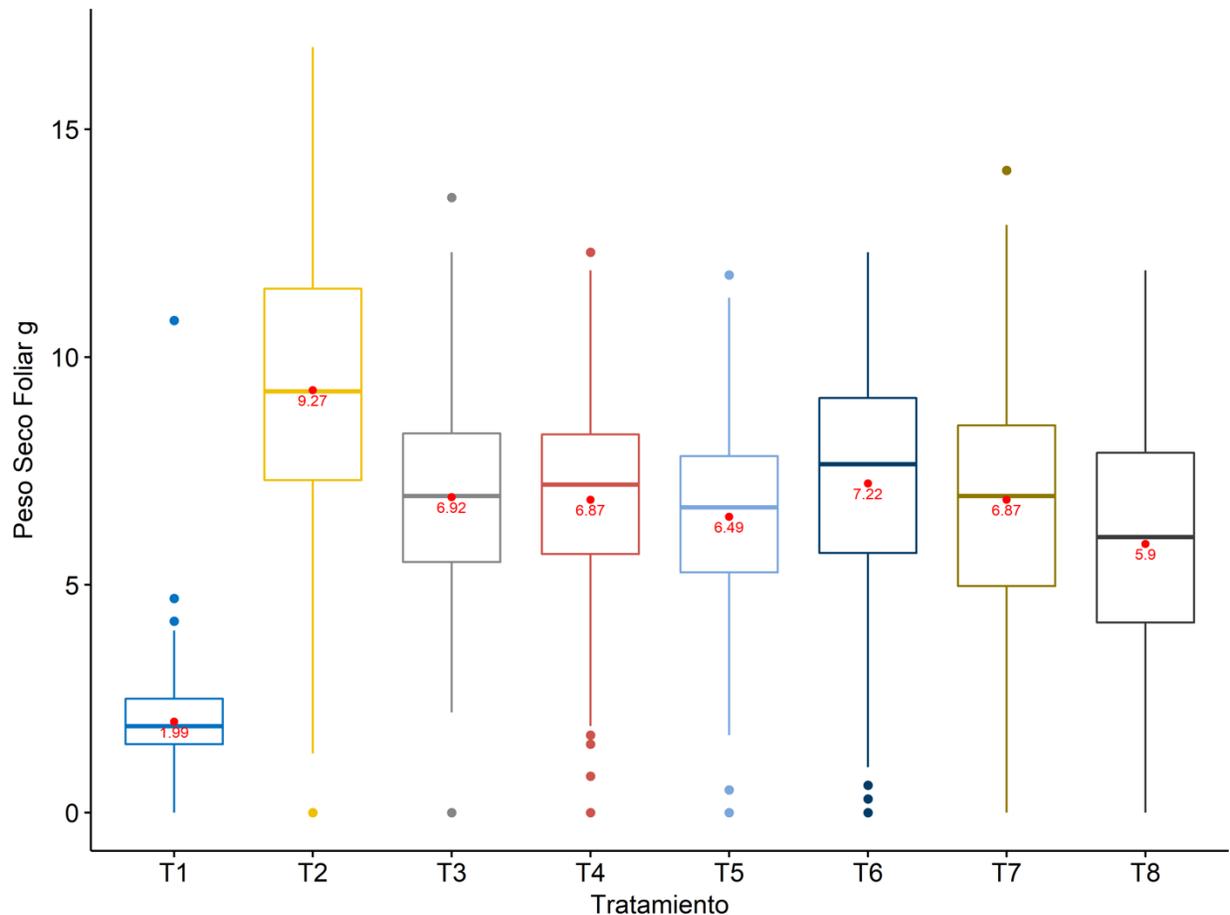


Figura 14. Peso seco foliar promedio de las plántulas de café expuestas a los diferentes tipos de compost experimentales y controles. T1 suelo sin fertilizante, T2 humus de lombriz y NPK, T3 compost puro, T4 compost con MMR, T5 compost con MMP, T6 compost con LDBIO, T7 compost con MMR y LDBIO A y T8 compost con MMR y LDBIO B. 2018. Las cajas representan el agrupamiento del 50% de los datos (segundo y tercer cuartil) y la línea interna, la mediana. La numeración en rojo muestra el peso seco promedio obtenido en cada tratamiento. Existen diferencias significativas entre los tratamientos ( $p < 0.05$ ).

Las diferencias detectadas entre el peso seco promedio de las plántulas expuestas a los tratamientos que contienen los compost experimentales (T3- al T8) con respecto al testigo (T1) son estadísticamente significativas ( $p < 0.0071$ ) (ver Cuadro 10). Estas diferencias son relevantes en términos prácticos ya que son mayores a los valores mínimos establecidos para discriminar la magnitud del efecto en el crecimiento del cultivo

(>5 g en peso seco total, >1.45 g en peso seco radicular, >1.20 g en peso seco de la parte leñosa, y >2.35 g en peso seco foliar), lo cual indica que la incorporación de compost en el sustrato de crecimiento, independientemente del tipo que sea utilizado, tiene un efecto positivo en el desarrollo del almácigo de café.

Cuadro 10. Comparación del peso seco promedio (g) de las plántulas de café entre el testigo (T1, suelo sin fertilizante) y los diferentes tipos de compost. Monteverde, Costa Rica. 2018.

Comparación	Diferencia Peso seco promedio (g)	%	Límite inferior	Límite superior	p-valor t- test	Significancia	Relevancia práctica
Peso seco total							
T1-T2	13.26	279.75	11.92	14.6	<0.001	S	R
T1-T3	10.61	223.84	9.27	11.95	<0.001	S	R
T1-T4	9.64	203.38	8.3	10.98	<0.001	S	R
T1-T5	9.42	198.73	8.08	10.76	<0.001	S	R
T1-T6	10.52	221.94	9.18	11.86	<0.001	S	R
T1-T7	9.76	205.91	8.42	11.1	<0.001	S	R
T1-T8	6.99	147.47	5.65	8.33	<0.001	S	R
Peso seco radicular							
T1-T2	3.14	263.87	2.69	3.59	<0.001	S	R
T1-T3	3.08	258.82	2.63	3.53	<0.001	S	R
T1-T4	2.65	222.69	2.2	3.1	<0.001	S	R
T1-T5	2.82	236.97	2.37	3.27	<0.001	S	R
T1-T6	2.96	248.74	2.51	3.41	<0.001	S	R
T1-T7	2.62	220.17	2.17	3.07	<0.001	S	R
T1-T8	1.51	126.89	1.06	1.96	<0.001	S	R
Peso seco tallo y ramitas							
T1-T2	3.05	256.30	2.73	3.37	<0.001	S	R
T1-T3	2.56	215.13	2.24	2.88	<0.001	S	R
T1-T4	2.11	177.31	1.79	2.43	<0.001	S	R
T1-T5	2.1	176.47	1.78	2.42	<0.001	S	R
T1-T6	2.37	199.16	2.05	2.69	<0.001	S	R
T1-T7	2.27	190.76	1.95	2.59	<0.001	S	R
T1-T8	1.58	132.77	1.26	1.9	<0.001	S	R
Peso seco foliar							
T1-T2	7.28	365.83	6.66	7.9	<0.001	S	R
T1-T3	4.93	247.74	4.31	5.55	<0.001	S	R
T1-T4	4.88	245.23	4.26	5.5	<0.001	S	R
T1-T5	4.5	226.13	3.88	5.12	<0.001	S	R

Continúa Cuadro 10

Comparación	Diferencia Peso seco promedio (g)	%	Límite inferior	Límite superior	p-valor t- test	Significancia	Relevancia práctica
T1-T6	5.23	262.81	4.61	5.85	<0.001	S	R
T1-T7	4.88	245.23	4.26	5.5	<0.001	S	R
T1-T8	3.91	196.48	3.29	4.53	<0.001	S	R

Peso seco total: Intervalos de confianza simultáneos con la corrección de Bonferroni = Diferencia $\pm$ 1.34 g. Significancia ajustada con la corrección de Bonferroni (0.05/7=0.0071), significativo (S)= $p < 0.0071$ , No significativo (NS)=  $p \geq 0.0071$ . Relevancia, relevante (R) Diferencia  $\geq 5$  g, no relevante (NR) Diferencia  $< 5$  g. Peso seco radicular: Intervalos de confianza simultáneos con la corrección de Bonferroni = Diferencia $\pm$ 0.45 g. Significancia ajustada con la corrección de Bonferroni (0.05/7=0.0071), significativo (S)= $p < 0.0071$ , No significativo (NS)=  $p \geq 0.0071$ . Relevancia, relevante (R) Diferencia  $\geq 5$  g x 29% (peso promedio raíz) 1.45 g, no relevante (NR) Diferencia  $< 1.45$  g. Peso seco tallo y ramitas: Intervalos de confianza simultáneos con la corrección de Bonferroni = Diferencia $\pm$ 0.32 g. Significancia ajustada con la corrección de Bonferroni (0.05/7=0.0071), significativo (S)= $p < 0.0071$ , No significativo (NS)=  $p \geq 0.0071$ . Relevancia, relevante (R) Diferencia  $\geq 5$  g x 24% (peso promedio tallo y ramitas) 1.20 g, no relevante (NR) Diferencia  $< 1.20$  g. Peso seco foliar: Intervalos de confianza simultáneos con la corrección de Bonferroni = Diferencia $\pm$ 0.62 g. Significancia ajustada con la corrección de Bonferroni (0.05/7=0.0071), significativo (S)= $p < 0.0071$ , No significativo (NS)=  $p \geq 0.0071$ . Relevancia, relevante (R) Diferencia  $\geq 5$  g x 48% (peso promedio foliar) 2.35 g, no relevante (NR) Diferencia  $< 2.35$  g.

Las diferencias de los promedios entre los tratamientos que contienen los compost experimentales (T3 al T8) con respecto al tratamiento de fertilización más intensivo (T2) son significativas a nivel del peso seco total ( $p < 0.0083$ ) (ver Cuadro 11). De igual forma, son significativas a nivel de la parte leñosa (excepto con respecto al T3) y foliar ( $p < 0.0083$ ); y no son significativas a nivel de la parte radicular (excepto con respecto al tratamiento T8,  $p < 0.0083$ ). Sin embargo, a nivel del peso seco total, estas diferencias son irrelevantes desde el punto de vista de practicidad ya que no sobrepasan los 5 g mínimos, por lo que se infiere que el efecto de los compost experimentales sobre el desarrollo global del almácigo de café es equivalente al obtenido con el sistema más

intensivo, excepto en el tratamiento que utiliza brosa de café (T8), en el cual la diferencia es > 5 g.

En ese mismo set de comparaciones (T2 vs. T3-T8), las diferencias a nivel de desarrollo radicular y leñoso no son relevantes ya que no sobrepasan los niveles mínimos (1.45 g y 1.20 g, respectivamente), excepto con respecto al tratamiento T8, donde la diferencia del peso seco de la parte leñosa sí es relevante ya que sobrepasa el valor mínimo de 1.20 g. A nivel del peso seco foliar, la mayoría de las diferencias son relevantes, con lo cual se infiere que el desarrollo de la parte foliar del almácigo expuesto al T2 es superior al expuesto a los tratamientos experimentales, lo cual puede generar un efecto positivo en el desarrollo futuro de las plantas. Cabe resaltar que la diferencia en desarrollo foliar del T2 con respecto al T6 no es relevante, lo cual indica que a este nivel, el desarrollo foliar del almácigo expuesto al T6 es equivalente al del tratamiento más intensivo.

Cuadro 11. Comparación del peso seco promedio (g) de las plántulas de café entre el tratamiento más intensivo (T2, vermicompost+NPK) y los diferentes tipos de compost. Monteverde, Costa Rica. 2018.

Comparación	Diferencia Peso seco promedio (g)	%	Límite inferior	Límite superior	p-valor t-test	Significancia	Relevancia práctica
Peso seco total							
T2-T3	2.90	15.92	1.51	4.29	<0.001	S	NR
T2-T4	3.83	21.02	2.44	5.22	<0.001	S	NR
T2-T5	4.05	22.23	2.66	5.44	<0.001	S	NR
T2-T6	2.95	16.19	1.56	4.34	<0.001	S	NR
T2-T7	3.71	20.36	2.32	5.1	<0.001	S	NR
T2-T8	6.48	35.57	5.09	7.87	<0.001	S	R
Peso seco radicular							
T2-T3	0.06	1.28	0	0.53	0.76	NS	NR
T2-T4	0.49	10.43	0.02	0.96	0.01	NS	NR
T2-T5	0.32	6.81	0	0.79	0.1	NS	NR
T2-T6	0.23	4.89	0	0.7	0.26	NS	NR
T2-T7	0.52	11.06	0.52	0.99	0.01	NS	NR
T2-T8	1.63	34.68	1.16	2.1	<0.001	S	NR
Peso seco ramas y ramitas							
T2-T3	0.49	11.56	0.15	0.83	0.001	NS	NR
T2-T4	0.94	22.17	0.6	1.28	<0.001	S	NR
T2-T5	0.95	22.41	0.61	1.29	<0.001	S	NR

Continúa Cuadro 11

Comparación	Diferencia Peso seco promedio (g)	%	Límite inferior	Límite superior	p-valor t-test	Significancia	Relevancia práctica
T2-T6	0.68	16.04	0.34	1.02	<0.001	S	NR
T2-T7	0.78	18.40	0.44	1.12	<0.001	S	NR
T2-T8	1.47	34.67	1.13	1.81	<0.001	S	R
Peso seco foliar							
T2-T3	2.35	25.35	1.72	2.98	<0.001	S	R
T2-T4	2.40	25.89	1.77	3.03	<0.001	S	R
T2-T5	2.78	29.99	2.15	3.41	<0.001	S	R
T2-T6	2.05	22.11	1.42	2.68	<0.001	S	NR
T2-T7	2.40	25.89	1.77	3.03	<0.001	S	R
T2-T8	3.37	36.35	2.74	4	<0.001	S	R

Peso seco total: Intervalos de confianza simultáneos con la corrección de Bonferroni. Diferencia  $\pm 1.39$  g. Significancia ajustada con la corrección de Bonferroni ( $0.05/6=0.0083$ ), significativo (S)= $p<0.0083$ , No significativo (NS)=  $p\geq 0.0083$ . Relevancia, relevante (R) Diferencia  $\geq 5$  g, no relevante (NR) Diferencia  $< 5$  g. Peso seco radicular: Intervalos de confianza simultáneos con la corrección de Bonferroni. Diferencia  $\pm 0.47$  g. Significancia ajustada con la corrección de Bonferroni ( $0.05/6=0.0083$ ), significativo (S)= $p<0.0083$ , No significativo (NS)=  $p\geq 0.0083$ . Relevancia, relevante (R) Diferencia  $\geq 5$  g x 29% (peso promedio raíz) 1.45 g, no relevante (NR) Diferencia  $< 1.45$  g. Peso seco leñoso: Intervalos de confianza simultáneos con la corrección de Bonferroni. Diferencia  $\pm 0.34$  g. Significancia ajustada con la corrección de Bonferroni ( $0.05/6=0.0083$ ), significativo (S)= $p<0.0083$ , No significativo (NS)=  $p\geq 0.0083$ . Relevancia, relevante (R) Diferencia  $\geq 5$  g x 24% (peso promedio leñoso) 1.20 g, no relevante (NR) Diferencia  $< 1.20$  g. Peso seco foliar: Intervalos de confianza simultáneos con la corrección de Bonferroni. Diferencia  $\pm 0.63$  g. Significancia ajustada con la corrección de Bonferroni ( $0.05/6=0.0083$ ), significativo (S)= $p<0.0083$ , No significativo (NS)=  $p\geq 0.0083$ . Relevancia, relevante (R) Diferencia  $\geq 5$  g x 48% (peso promedio foliar) 2.35 g, no relevante (NR) Diferencia  $< 2.35$  g.

Las diferencias del peso seco promedio entre los tratamientos que contienen los compost experimentales tratados con MM y LDBIO (T4 al T8) con respecto al tratamiento de fertilización con compost puro (T3) no son significativas ( $p<0.01$ ), excepto con respecto al T8, lo cual se repite a nivel radicular, leñoso y foliar (ver Cuadro 12), y en la parte

leñosa en los tratamientos T4 y T5. Todas las diferencias detectadas tanto a nivel del desarrollo global, como a los niveles específicos de raíces, tallos y hojas, exceptuando el T8 a nivel radicular, son irrelevantes ya que se encuentran por debajo de los valores mínimos respectivos. Esto indica que la incorporación de MM y LDBIO en las dosis utilizadas y en el rango de tiempo medido, no produce un efecto tangible en el desarrollo de las plantas, lo cual puede deberse a que el aporte de nutrientes de dichos agentes al suelo (Cuadro 13), no son suficientes para producir efectos significativos sobre el desarrollo del cultivo. En el caso del tratamiento T8, se evidencia que la combinación de dichos agentes con la brosa de café como principal residuo biomásico para producción de compost, produce rendimientos menores al control.

Cuadro 12. Comparación del peso seco promedio (g) de las plántulas de café entre el compost puro (T3, sin enmendar) y los compost enmendados. Monteverde, Costa Rica. 2018.

Comparación	Diferencia Peso seco promedio (g)	%	Límite inferior	Límite superior	p-valor t- test	Significancia	Relevancia
<b>Peso seco total</b>							
T3-T4	0.93	6.07	0	2.24	0.064	NS	NR
T3-T5	1.15	7.51	0	2.46	0.021	NS	NR
T3-T6	0.05	0.33	0	1.36	0.924	NS	NR
T3-T7	0.81	5.29	0	2.12	0.129	NS	NR
T3-T8	3.58	23.38	2.27	4.89	<0.001	S	NR
<b>Peso seco radicular</b>							
T3-T4	0.43	9.27	0	0.89	0.017	NS	NR
T3-T5	0.26	5.60	0	0.72	0.164	NS	NR
T3-T6	0.17	3.66	0	0.63	0.378	NS	NR
T3-T7	0.46	9.91	0	0.92	0.017	NS	NR
T3-T8	1.57	33.84	1.11	2.03	<0.001	S	R
<b>Peso seco ramas y ramitas</b>							
T3-T4	0.45	12.00	0.12	0.78	0.00137	S	NR
T3-T5	0.46	12.27	0.13	0.79	0.00086	S	NR
T3-T6	0.19	5.07	0	0.52	0.20056	NS	NR
T3-T7	0.29	7.73	0	0.62	0.04597	NS	NR
T3-T8	0.98	26.13	0.65	1.31	<0.001	S	NR

Continúa Cuadro 12

Comparación	Diferencia Peso seco promedio (g)	%	Límite inferior	Límite superior	p-valor t- test	Significancia	Relevancia
Peso seco foliar							
T3-T4	0.05	0.72	0	0.64	0.811	NS	NR
T3-T5	0.43	6.21	0	1.02	0.045	NS	NR
T3-T6	0.3	4.34	0	0.89	0.226	NS	NR
T3-T7	0.05	0.72	0	0.64	0.815	NS	NR
T3-T8	1.02	14.74	0	1.61	<0.001	S	NR

Peso seco total: Intervalos de confianza simultáneos con la corrección de Bonferroni. Diferencia  $\pm 1.31$  g. Significancia ajustada con la corrección de Bonferroni ( $0.05/5=0.01$ ), significativo (S)= $p < 0.01$ , No significativo (NS)=  $p \geq 0.01$ . Relevancia, relevante (R) Diferencia  $\geq 5$  g, no relevante (NR) < Diferencia 5 g. Peso seco radicular: Intervalos de confianza simultáneos con la corrección de Bonferroni. Diferencia  $\pm 1.31$  g. Significancia ajustada con la corrección de Bonferroni ( $0.05/5=0.01$ ), significativo (S)= $p < 0.01$ , No significativo (NS)=  $p \geq 0.01$ . Relevancia, relevante (R) Diferencia  $\geq 1.45$  g, no relevante (NR) < Diferencia 1.45 g. Peso seco leñoso: Intervalos de confianza simultáneos con la corrección de Bonferroni. Diferencia  $\pm 0.33$  g. Significancia ajustada con la corrección de Bonferroni ( $0.05/5=0.01$ ), significativo (S)= $p < 0.01$ , No significativo (NS)=  $p \geq 0.01$ . Relevancia, relevante (R) Diferencia  $\geq 1.20$  g, no relevante (NR) < Diferencia 1.20 g. Peso seco foliar: Intervalos de confianza simultáneos con la corrección de Bonferroni. Diferencia  $\pm 0.59$  g. Significancia ajustada con la corrección de Bonferroni ( $0.05/5=0.01$ ), significativo (S)= $p < 0.01$ , No significativo (NS)=  $p \geq 0.01$ . Relevancia, relevante (R) Diferencia  $\geq 2.35$  g, no relevante (NR) < Diferencia 2.35 g.

Cuadro 13. Caracterización química y microbiológica de una muestra de las mezclas de suelo y compost (33%/67%). Monteverde, Costa Rica. 2017.

Tratamiento	SUELO T1	VERMI-COMPOST T2	COPURO T3	COMMR T4	COMMP T5	COLDBIO T6	COMMR LDBIOA T7	COMMR LDBIOB T8	Nivel Crítico NA
pH	6.1	6.4	6.6	6.7	6.7	6.5	6.6	6.7	5.5
Biomasa microbiana (mgC/kg suelo)	72	126	130	91	69	50	117	136	NA
Acidez cmol(+)/L	0.14	0.14	0.14	0.13	0.13	0.13	0.14	0.13	0.5
Ca cmol(+)/L	9.47	14.38	10.07	9.37	8.55	9.63	9.36	9.37	4
Mg cmol(+)/L	1.8	4.01	3.51	3.83	3.33	3.27	3.67	3.34	1
K cmol(+)/L	0.54	3.24	3.22	3.44	3.4	3.13	3.3	3.25	0.2
CICE cmol(+)/L	11.95	21.77	16.94	16.77	15.41	16.16	16.47	16.09	5
Saturación de Acidez (%)	1.2	0.6	0.8	0.8	0.8	0.8	0.9	0.8	NA
P (mg/L)	4	12	14	34	26	23	35	20	10
Zn (mg/L)	6.6	7.4	13.1	11.2	10.8	14.2	14.1	13.3	3
Cu (mg/L)	5	3	4	4	5	5	4	5	1
Fe (mg/L)	104	37	81	86	90	102	91	85	10
Mn (mg/L)	13	12	18	20	18	16	20	18	5
CE mS/cm	0.2	4.6	2.6	3.2	2.4	3.1	3.3	2.4	1.5

Con respecto a las concentraciones de nutrientes, es importante considerar que existe una diferencia en el método empleado para identificar los niveles de nutrientes en el compost en comparación con el suelo, donde en el primero, el método utilizado es una digestión de tejidos (Kalra, 1998; Garfield *et al.*, 2000), mientras que el segundo es una extracción con solución extractora que libera los nutrientes contenidos en las muestras de suelo (Días Romeu *et al.*, 1978; Soil Science Society of America, 1996). Debido a que son dos metodologías diferentes, no se puede esperar una relación directa entre las características del compost y las características del suelo enmendado con compost, por lo que la forma más razonable para evaluar el efecto del abono sobre las características del suelo es comparando los datos del análisis de suelo con respecto a un control, que en este caso es el suelo sin enmendar, y a los valores críticos establecidos a nivel experimental para el óptimo crecimiento de los cultivos.

Otro aspecto importante a considerar, es que la mineralización de nutrientes a partir del proceso de descomposición de la materia orgánica por parte de la comunidad microbiana presente tanto en el suelo como en el compost, es un proceso gradual que continúa aún

después de la incorporación del compost en el suelo (Paulin & O'Malley, 2008; Bernal *et al.*, 2017a). Asimismo, puede haber consumo de los nutrientes por parte de los microorganismos (Kaye & Hart, 1997; Lambers *et al.*, 2008; Barton, 2012), por lo que los valores detectados a la hora de hacer los análisis, solo muestran las concentraciones en un momento determinado, las cuales pueden cambiar en el corto plazo.

Las características propias del suelo es un factor determinante en la valoración del efecto de la fertilización dirigida con abono orgánico o sintético sobre el cultivo. El suelo de la finca experimental utilizado para el estudio se clasifica como un Andisol formado en altas condiciones de humedad derivado de la meteorización de material volcánico (Clark *et al.*, 2000; INTA, 2015). Este suelo se caracteriza por tener una alta porosidad y una baja densidad aparente ( $<0.9 \text{ gcm}^3$ ), lo cual lo hace propenso a mantener un alto contenido de humedad y a favorecer la conductividad hidráulica en condiciones de saturación. La textura del suelo es limosa a franco arenosa, lo que provoca que se descomponga fácilmente con la manipulación (Clark *et al.*, 2000). El color café oscuro proviene del alto contenido de materia orgánica del sustrato, el cual es cercano al 10%, mientras que el pH oscila alrededor de 6 (INTA, 2015; Fernández, 2018).

Los Andisoles pueden contener arcillas y óxidos e hidróxidos de Fe y Al (Alvarado *et al.*, 2014; INTA, 2015), y una alta capacidad de fijación de fosfatos, lo cual puede afectar la adecuada absorción de este compuesto por parte de los cultivos (Alcalá *et al.*, 2009). Al ser suelos altamente sensibles a la erosión y la pérdida de fertilidad por el deterioro antropogénico del contenido de materia orgánica y biodiversidad microbiana, las actividades de manejo y conservación deben estar dirigidas precisamente al mantenimiento de esos factores, cuya recuperación y optimización puede lograrse por medio del empleo de métodos sostenibles de manejo como la incorporación de microorganismos eficientes, micorrizas arbusculares y el compostaje estratégico de residuos biomásicos (Garg *et al.*, 2010; Suchini Ramírez, 2012; FAO, 2013b).

Los análisis de suelos sugieren que la incorporación del compost tratado con MM y LDBIO en el sustrato optimizó los niveles de pH, acercándolo al valor neutro de 7, lo cual es favorable para los sistemas de producción. La neutralidad del pH es un factor determinante que regula la disponibilidad de los nutrientes para las plantas, mediante el

control de las formas químicas solubles (Kass, 1996). El compost con MM y LDBIO en forma integrada, así como el compost puro y el vermicompost también optimizaron el contenido de biomasa microbiana en el suelo. Este es un resultado que puede derivarse en beneficios para la fertilidad del agroecosistema, ya que el mayor contenido de biomasa microbiana puede aumentar las tasas de descomposición de la materia orgánica y la mineralización de los nutrientes en sustancias solubles para favorecer el crecimiento de las plantas (Bot *et al.*, 2005a; Altieri *et al.*, 2015).

La presencia de compost no modificó la acidez intercambiable del suelo ( $Al+3H^+$ ). Este parámetro se mantuvo en el rango óptimo en menos de  $<3$  cmol/L (Molina & Alvarado, 2007). El compost optimizó la suma de bases intercambiables ( $Ca^+$ ,  $Mg^+$ ,  $K^+$ ) así como la capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE, suma de bases + acidez intercambiable  $Al+3H^+$ ), y la saturación de acidez (acidez intercambiable/CICE x 100) (Molina *et al.*, 2007), lo cual mejora las condiciones de fertilidad del sustrato favoreciendo el proceso de adquisición de los nutrientes por el cultivo.

La incorporación de compost en el sustrato optimizó el contenido de P (Molina, 2007). El nivel de este elemento alcanzado en el suelo tratado con el compost experimental fue de más de dos veces la concentración en el suelo enmendado con vermicompost y más de 8 veces la concentración de ese elemento en el suelo sin enmendar. Este resultado es altamente valioso para los productores de almacigo de café y de café en general ya que el P es uno de los elementos más escasos y de mayor demanda en este cultivo (Reis *et al.*, 2011; Dias *et al.*, 2015). El compostaje de residuos biomásicos representa una alternativa real para recuperar y reciclar este valioso elemento en los agroecosistemas cafetaleros.

La adición de compost no tuvo influencia sobre la concentración de Cu y Mn en el suelo. Ambos elementos se mantuvieron dentro de los rangos óptimos según lo indicado por Molina (2007), por lo que la toxicidad aportada por estos elementos es poco probable. El riesgo de toxicidad en el suelo por exceso de Zn y de Fe es más probable, debido a que la presencia de compost en el sustrato, aumentó las concentraciones de estos dos elementos por encima de los niveles tolerables por las plántulas reportados por Molina (2007). La toxicidad aportada por estos elementos puede causar problemas de

germinación, inhibición del desarrollo radicular y del crecimiento general de las plantas (Stoffella & Kahn, 2001; Molina, 2007).

El suelo sin enmendar registró un nivel de salinidad óptima (Andrades & Martínez, 2014). La presencia de vermicompost y abono sintético NPK 10:30:10 aumentó la salinidad del suelo por encima del nivel recomendado ( $>2$  mS/cm) convirtiendo el sustrato en un medio completamente salino, mientras que los compost experimentales condujeron a que el suelo se tornara ligeramente salino (Andrades *et al.*, 2014). La presencia de sales en el sustrato como el  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^+$ ,  $\text{Mg}^+$  puede provocar problemas de absorción de agua y minerales disueltos por las plantas, lo cual consecuentemente puede tener efectos sobre el óptimo crecimiento del cultivo (Spellman & Whiting, 2007). Los problemas de salinidad pueden ser corregidos con el riego para propiciar el lavado de las sales contenidas en el compost (Illera-Vives *et al.*, 2014).

La presencia del compost en el medio de crecimiento favoreció la tasa de absorción de nitrógeno y no tuvo efecto sobre el rendimiento en la adquisición de fósforo (ver Figuras 15 y 16). Sin embargo, la incorporación de este material, suprimió la capacidad de las plantas de absorber potasio y azufre (ver Figuras 17 y 18). Esto podría deberse a que este abono no hace un aporte suficiente de estos elementos al sistema de producción, por lo que las cantidades detectadas en los tejidos corresponden a las concentraciones disponibles en la parte de suelo que conforma las unidades de crecimiento, la cual corresponde a 67% del volumen en cada unidad.

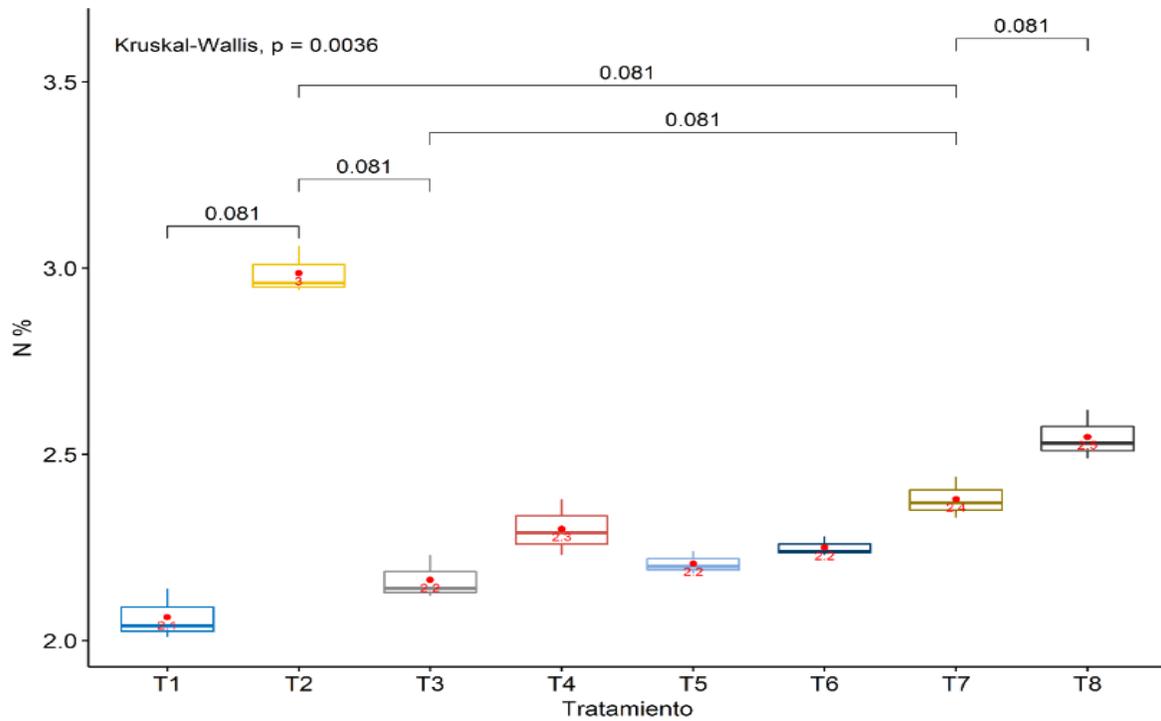


Figura 15. Concentración de nitrógeno en los tejidos foliares. T1 suelo sin fertilizante, T2 humus de lombriz y NPK, T3 compost puro, T4 compost con MMR, T5 compost con MMP, T6 compost con LDBIO, T7 compost con MMR y LDBIO A y T8 compost con MMR y LDBIO B. 2018. Las cajas representan el agrupamiento del 50% de los datos (segundo y tercer cuartil) y la línea interna, la mediana. La numeración en rojo muestra el promedio obtenido en cada tratamiento.

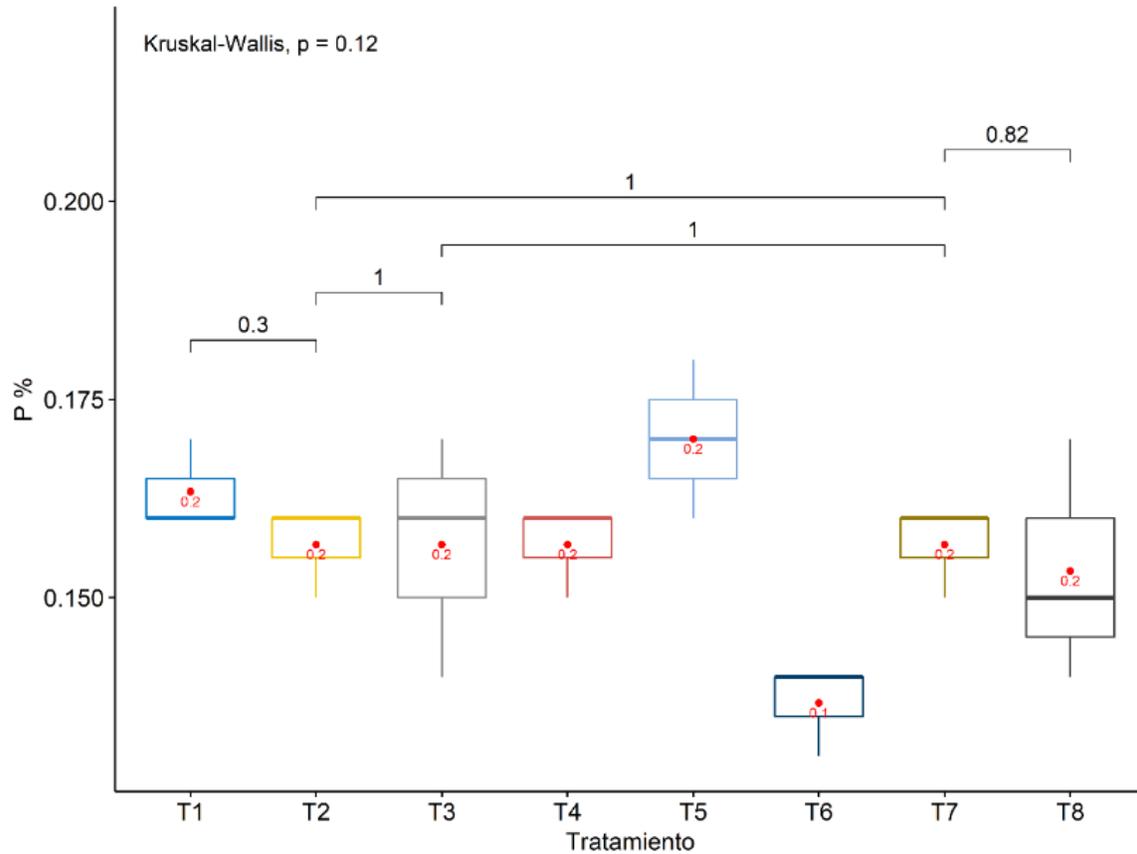


Figura 16. Concentración de fósforo en los tejidos foliares. T1 suelo sin fertilizante, T2 humus de lombriz y NPK, T3 compost puro, T4 compost con MMR, T5 compost con MMP, T6 compost con LDBIO, T7 compost con MMR y LDBIO A y T8 compost con MMR y LDBIO B. 2018. Las cajas representan el agrupamiento del 50% de los datos (segundo y tercer cuartil) y la línea interna, la mediana. La numeración en rojo muestra el promedio obtenido en cada tratamiento.

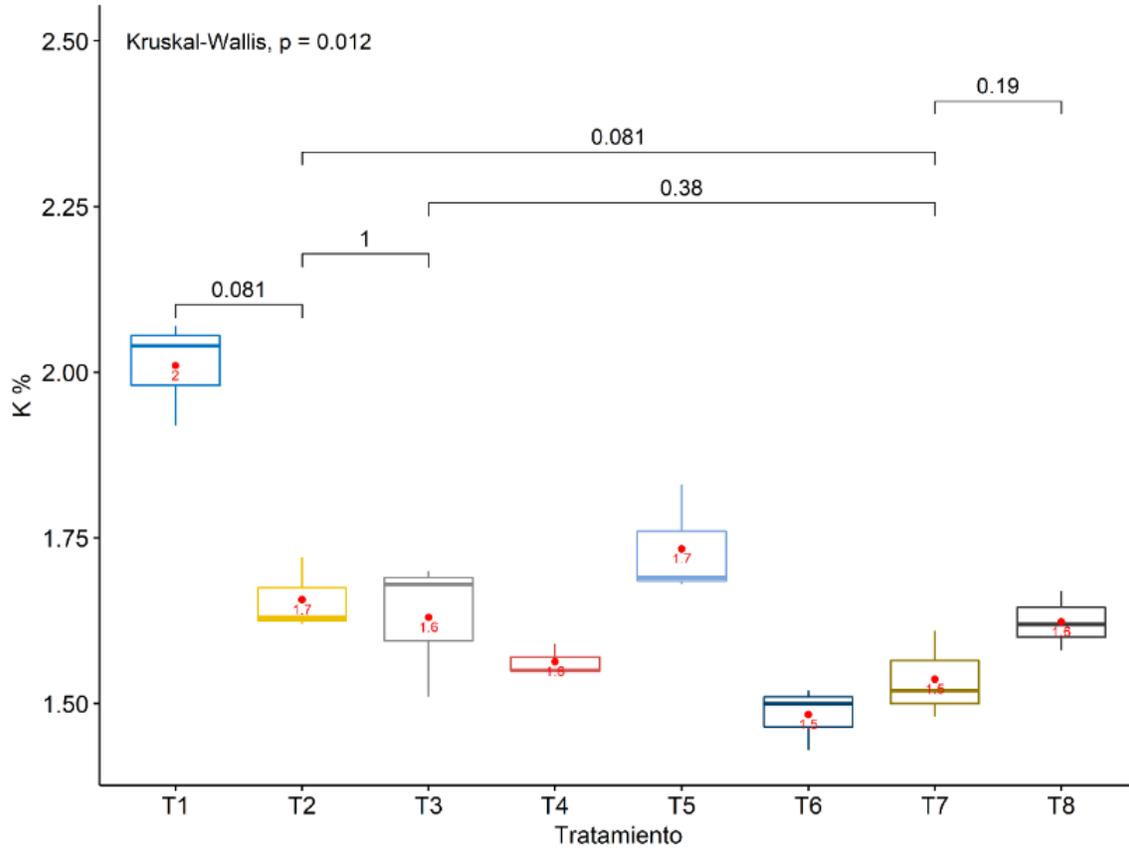


Figura 17. Concentración de potasio en los tejidos foliares. T1 suelo sin fertilizante, T2 humus de lombriz y NPK, T3 compost puro, T4 compost con MMR, T5 compost con MMP, T6 compost con LDBIO, T7 compost con MMR y LDBIO A y T8 compost con MMR y LDBIO B. 2018. Las cajas representan el agrupamiento del 50% de los datos (segundo y tercer cuartil) y la línea interna, la mediana. La numeración en rojo muestra el promedio obtenido en cada tratamiento.

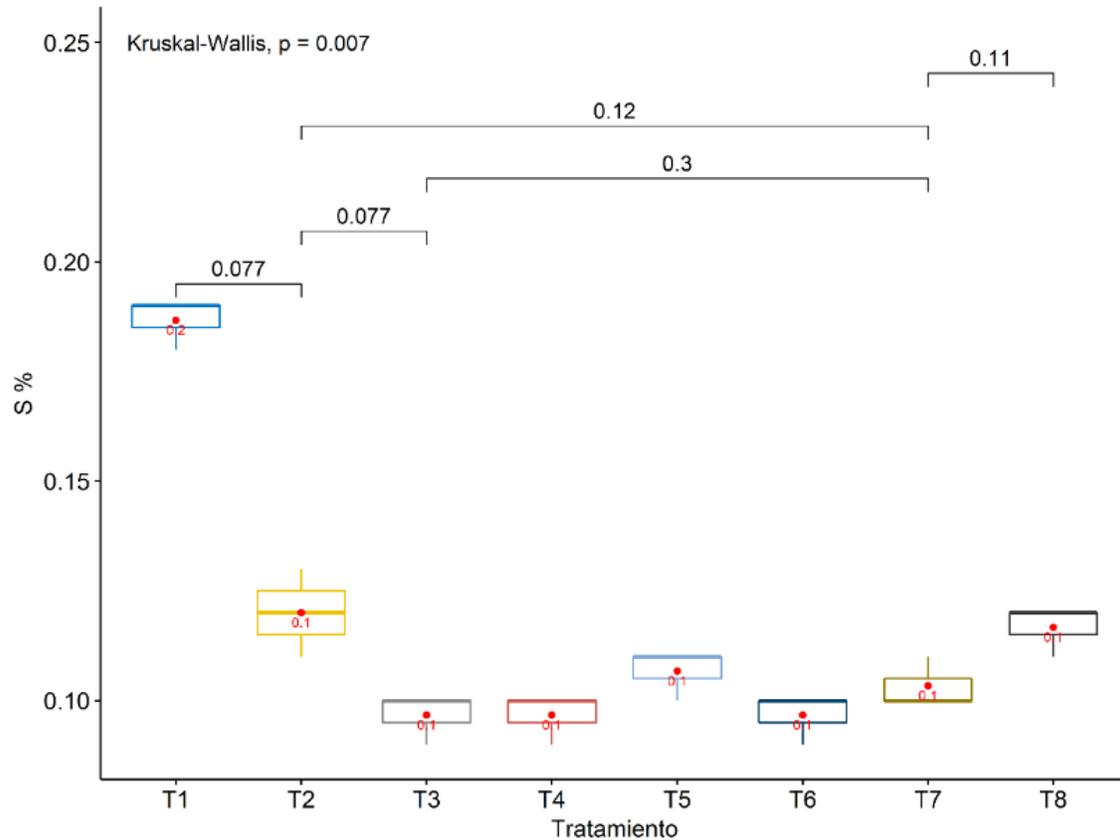


Figura 18. Concentración de azufre en los tejidos foliares. T1 suelo sin fertilizante, T2 humus de lombriz y NPK, T3 compost puro, T4 compost con MMR, T5 compost con MMP, T6 compost con LDBIO, T7 compost con MMR y LDBIO A y T8 compost con MMR y LDBIO B. 2018. Las cajas representan el agrupamiento del 50% de los datos (segundo y tercer cuartil) y la línea interna, la mediana. La numeración en rojo muestra el promedio obtenido en cada tratamiento.

#### 4.3.2 ESTADO FITOSANITARIO

La aplicación de compost tiene un efecto positivo sobre el estado fitosanitario del almácigo de café. Únicamente el 3% de las plántulas no fertilizadas, alcanzaron un estado saludable y muy saludable, mientras que las que sí recibieron fertilización alcanzaron niveles de salud óptima en porcentajes cercanos al 90% de los cafetos, exceptuando los tratamientos T7 y T8, donde los porcentajes de plántulas con estado

saludable y muy saludable fueron 84 y 74% respectivamente (Cuadro 14 y Figura 19). No se detectó la presencia de roya en ninguna de las plántulas y la presencia de ojo de gallo fue incipiente en toda el área de experimentación (Cuadro 14).

Cuadro 14. Estado fitosanitario del almácigo de café por tratamiento. Monteverde, Costa Rica. 2018.

Escala	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
Estado fitosanitario								
1	1 (1%)	111 (56%)	93 (47%)	111 (56%)	100 (50%)	121 (61%)	90 (45%)	83 (42%)
2	3 (2%)	74 (37%)	90 (45%)	73 (37%)	78 (39%)	66 (33%)	78 (39%)	64 (32%)
3	41 (21%)	9 (5%)	14 (7%)	8 (4%)	14 (7%)	7 (4%)	22 (11%)	31 (16%)
4	132 (66%)	3 (2%)	0 (0%)	4 (2%)	4 (2%)	4 (2%)	9 (5%)	17 (9%)
5	22 (11%)	1 (1%)	2 (1%)	2 (1%)	2 (1%)	1 (1%)	0 (0%)	1 (1%)
6	1 (1%)	2 (1%)	1 (1%)	2 (1%)	2 (1%)	1 (1%)	1 (1%)	4 (2%)
Total	(100%)	(100%)	(100%)	(100%)	(100%)	(100%)	(100%)	(100%)
Ojo de gallo								
0	8 (4%)	138 (69%)	70 (35%)	102 (51%)	85 (43%)	116 (58%)	79 (40%)	119 (60%)
1	168 (84%)	60 (30%)	128 (64%)	85 (42%)	111 (55%)	83 (42%)	121 (60%)	78 (39%)
2	11 (22%)	2 (1%)	2 (1%)	13 (7%)	4 (2%)	1 (1%)	0	3 (11%)
3	1 (1%)	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	(100%)	(100%)	(100%)	(100%)	(100%)	(100%)	(100%)	(100%)

Escala del estado fitosanitario: 1: Muy saludable (criterios: vitalidad óptima, crecimiento óptimo, follaje frondoso color verde oscuro intenso, no presenta signos visibles de plagas o enfermedades que puedan comprometer el desarrollo futuro de la planta), 2: Saludable (vitalidad aceptable, crecimiento aceptable, follaje frondoso mayormente verde, presenta signos visibles leves de plagas o enfermedades que puedan comprometer el desarrollo futuro de la planta), 3: Intermedio (vitalidad intermedia, crecimiento intermedio, follaje entre verde y amarillento, presenta signos visibles de plagas o enfermedades que puedan comprometer el desarrollo futuro de la planta), 4: Poco saludable (criterios: vitalidad baja, crecimiento deficiente, follaje amarillento, presenta signos fuertes de plagas o enfermedades que puedan comprometer el desarrollo futuro de la planta). 5: No saludable (criterios: Sin vitalidad, crecimiento muy deficiente, follaje amarillento, presenta signos muy fuertes de plagas o enfermedades que puedan comprometer el desarrollo

futuro de la planta). 6: Muerto. Escala para el ojo de gallo. 0: ausente 1: <10% del área foliar infectada, 2: 10-25% del área foliar infectada, 3: 25-50% del área foliar infectada, 4: 50-75% del área foliar infectada, 5: >75% del área foliar infectada. Tratamientos. T1 suelo sin fertilizante, T2 humus de lombriz y NPK, T3 compost puro, T4 compost con MMR, T5 compost con MMP, T6 compost con LDBIO, T7 compost con MMP y LDBIO A y T8 compost con MMP y LDBIO B.

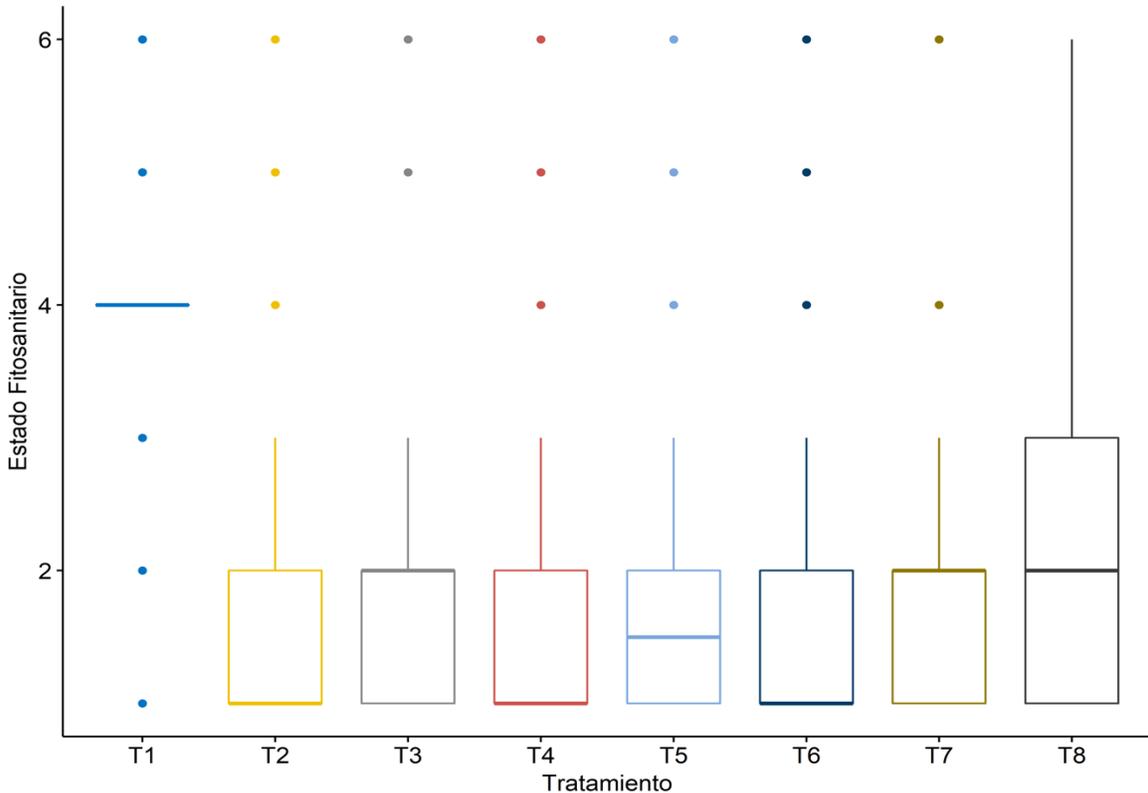


Figura 19. Estado fitosanitario de almácigo de café por tratamiento. T1 suelo sin fertilizante, T2 humus de lombriz y NPK, T3 compost puro, T4 compost con MMR, T5 compost con MMP, T6 compost con LDBIO, T7 compost con MMR y LDBIO A y T8 compost con MMR y LDBIO B. 2018. Las cajas representan el agrupamiento del 50% de los datos (segundo y tercer cuartil) y la línea interna, la mediana.

Tomando como base que las plántulas que podrían utilizarse para establecer una plantación de café serían solamente las que presentan un estado fitosanitario intermedio, saludable y muy saludable (3, 2 y 1 respectivamente), lo cual discrimina del sistema de producción a todas aquellas plántulas que tengan valores >3, en el Cuadro 15, se aprecia

que los tratamientos T1 y T8 son los que tienen la mayor propensión a generar plántulas con estado fitosanitario deficiente (>3) con respecto al T2 según la escala establecida. Los demás tratamientos experimentales no presentan una propensión significativamente diferente a la del T2 de producir plántulas con características indeseables, el cual tiene una tasa de producción de plántulas deficientes menor al 4%.

Cuadro 15. Razón de propensión (OR) de los tratamientos experimentales con respecto al tratamiento T2 a generar plántulas con estado fitosanitario deficiente >3. Monteverde, Costa Rica. 2018.

Tratamiento	B <sub>j</sub>	Razón de propensión a generar plántulas con estado fitosanitario >3 (OR)	p-valor del modelo logístico	Significancia
T1	4.71	111.37	0.000	S
T3	-0.71	0.49	0.321	NS
T4	0.30	1.35	0.588	NS
T5	0.30	1.35	0.588	NS
T6	0.00	1.00	1.000	NS
T7	0.53	1.70	0.312	NS
T8	1.39	4.00	0.003	S

Significancia ajustada con la corrección de Bonferroni ( $0.05/7=0.0071$ ), significativo (S)= $p<0.0071$ , No significativo (NS)=  $p\geq 0.0071$ . No aplica (NA). T2= Tratamiento de comparación. T1 suelo sin fertilizante, T2 humus de lombriz y NPK, T3 compost puro, T4 compost con MMR, T5 compost con MMP, T6 compost con LDBIO, T7 compost con MMR y LDBIO A y T8 compost con MMR y LDBIO B.

#### 4.3.3 ANÁLISIS DE COSTOS DE PRODUCCIÓN Y RELACIÓN COSTO/BENEFICIO

Los costos de producción de almácigo de café variaron entre los tratamientos en cuanto la inversión en materiales, así como en el costo del acarreo y la mano de obra (ver Cuadro 16). Este último rubro representó el principal costo y osciló entre un 50 y un 85% de la inversión total necesaria para producir las 200 plántulas que se utilizaron para cada tratamiento. El transporte de los materiales hacia el sitio de producción del almácigo representó el segundo costo más importante, el cual ocupó entre un 8 y 42% de la

inversión total de recursos. El valor de los insumos fue el costo más bajo, el cual, en el caso de los compost, fue casi nulo ya que se utilizaron residuos de la misma finca, mientras que en el caso del tratamiento T2, que es el que contiene fertilizante sintético y humus de lombriz californiana de brosa de café adquiridos en el mercado local, el valor de la inversión representó un 3% del costo total.

Cuadro 16. Análisis de costos de producción de los diferentes tratamientos. CR¢. Monteverde, Costa Rica. 2018.

Materiales	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
Preparación 134 kg suelo tamizado	2,516	2,516	2,516	2,516	2,516	2,516	2,516	2,516
66 kg vermicompost	-	2,475	-	-	-	-	-	-
Preparación 200 kg residuos hortaliza picado	-	-	3,774	3,774	3,774	3,774	3,774	-
Preparación 200 kg brosa	-	-	-	-	-	-	-	1,258
Preparación 200 kg hojas banano picadas	-	-	3,774	3,774	3,774	3,774	3,774	3,774
Preparación 60 kg madero negro picado	-	-	1,887	1,887	1,887	1,887	1,887	1,887
Preparación 40 kg LDBIO	-	-	-	-	-	1,258	1,258	1,258
10 l agua inicio	2	2	2	-	-	2	-	-
56 l agua estabilización	4	4	4	-	-	4	-	-
10 l MM inicio	-	-	-	149	149	-	149	149
56 l MM estabilización	-	-	-	832	832	-	832	832
16 g de NPK 10:30:10	-	4	-	-	-	-	-	-
Transporte suelo	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000
Transporte residuos hortaliza	-	-	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	-
Transporte residuos brosa	-	-	-	-	-	-	-	15,000
Transporte vermicompost	-	15,000	-	-	-	-	-	-
Transporte NPK	-	9,000	-	-	-	-	-	-
Mano obra preparación compost	-	-	420	420	420	420	420	420
Mano de obra volteo compost	-	-	105	105	105	105	105	105
Mano de obra aplicación MM	-	-	-	4,400	4,400	-	4,400	4,400
Mano de obra llenado de bolsas	12,580	12,580	12,580	12,580	12,580	12,580	12,580	12,580
Mano de obra germinación semillas	629	629	629	629	629	629	629	629
Mano de obra riego germinación	9,435	9,435	9,435	9,435	9,435	9,435	9,435	9,435
Mano de obra trasplante	2,097	2,097	2,097	2,097	2,097	2,097	2,097	2,097
Mano de obra deshierbado	2,935	2,935	2,935	2,935	2,935	2,935	2,935	2,935
Total	33,197	59,677	47,157	52,532	52,532	48,415	53,790	62,274

Continúa Cuadro 16

Materiales	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
Costo por plántula	166	298	236	263	263	242	269	311
Precio ICAFE (2017) almácigo convencional	206	206	206	206	206	206	206	206
Relación C/B convencional	0.81	1.45	1.14	1.28	1.28	1.18	1.31	1.51
Precio almácigo orgánico = x1.33	273.98	273.98	273.98	273.98	273.98	273.98	273.98	273.98
Relación C/B orgánico	0.61	1.09	0.86	0.96	0.96	0.88	0.98	1.14
Costo fertilización	0	26,485	13,965	19,340	19,340	15,223	20,598	29,082
Costo fertilización/planta	-	132.42	69.83	96.7	96.7	76.12	102.99	145.41
% del costo total	-	44.38	29.61	36.82	36.82	31.44	38.29	46.70
Costo de establecimiento 5,200 p/ha €/ha	863,132	1,551,594	1,226,092	1,365,835	1,365,835	1,258,800	1,398,543	1,619,127

T1 suelo sin fertilizante, T2 humus de lombriz y NPK, T3 compost puro, T4 compost con MMR, T5 compost con MMP, T6 compost con LDBIO, T7 compost con MMR y LDBIO A y T8 compost con MMR y LDBIO B. No incluye costos del biodigestor.

El costo de producción por plántula osciló entre €186 en el caso de las producidas con el tratamiento T1, que no tuvo ningún tipo de fertilización, hasta €331 en el caso de las cultivadas con el tratamiento T8, en el que se empleó brosa de café como uno de los principales residuos biomásicos para la elaboración del compost, lo cual tuvo un alto costo de transporte, por lo que fue el tratamiento que se posicionó con el costo de producción más alto. Las plántulas producidas con el tratamiento T2, fueron las segundas más costosas de cultivar ya que a pesar de que el valor del vermicompost y el abono sintético fue bajo, el costo de acarreo de esos insumos fue más alto que en el resto de los casos. La producción de plántulas con los otros abonos experimentales (T3-T8) mantuvieron costos de producción similares entre ellos, los cuales oscilaron entre €256 a €259 por plántula.

Los costos de fertilización totales y por plántula también variaron de acuerdo al tipo de fertilizante aplicado, lo cual está directamente relacionado al empleo de insumos externos en el sistema de fertilización, hecho que explica el mayor costo observado en los tratamientos T2 y T8. Los tratamientos T3 al T7, que emplearon compost elaborados en el sitio con insumos y residuos locales, registraron los menores costos de fertilización.

Los datos muestran que los tratamientos T2 y T8 presentan las relaciones costo beneficio más altas, lo cual se explica por tener los costos de producción más elevados. El

tratamiento T1, presenta la relación más baja al tener costos de producción mínimos, mientras que los tratamientos experimentales T3 al T7 presentan relaciones similares entre ellas. Cuando se utiliza el valor de venta del almácigo convencional publicado por el ICAFE (2017) para el cálculo de la relación costo beneficio, exceptuando al T1, las relaciones son mayores a 1, lo cual indica que los costos sobrepasan los beneficios, hecho que se explica porque se está utilizando como precio de venta un valor que no reconoce el origen orgánico del cultivo. Sin embargo, suponiendo que el almácigo se pudiera vender como orgánico con un sobreprecio del 33% del valor del almácigo convencional, las relaciones mejoran para los sistemas que utilizan compost y sugieren que es posible cubrir los costos de producción.

## CAPITULO V: DISCUSIÓN

### 5.1 OBJETIVO ESPECÍFICO 1: DISEÑAR UN SISTEMA DE BIOFERTILIZACIÓN ORGÁNICA CON COMPOST PRODUCIDO A PARTIR DE RESIDUOS BIOMÁSICOS LOCALES, MM Y LDBIO

El sistema de fertilización con compost producido con residuos biomásicos locales, microorganismos de montaña y lodos digeridos de biodigestor es un sistema que exhibe un nivel de viabilidad óptimo desde la óptica de diseño y proporción de los materiales que lo integran. El sistema cumplió satisfactoriamente con todos los parámetros teóricos del proceso del compostaje, incluyendo las tres etapas térmicas que aseguran la estabilidad y madurez del material terminado: fase mesófila ( $\leq 45^{\circ}\text{C}$ ), fase termófila ( $> 45^{\circ}\text{C}$ ) y fase de enfriamiento o mesófila II ( $\leq 45^{\circ}\text{C}$ ) (FAO, 2013b). El tiempo de estabilización y maduración de la biomasa en degradación se mantuvo dentro del rango normal en menos de 150 días, y la incorporación de los microorganismos y los lodos no afectó el pH, la conductividad eléctrica, la saturación de oxígeno ni el contenido de agua durante el proceso de transformación de la materia orgánica.

El alcance de la estabilidad en particular, es un logro de vital importancia ya que es la forma más directa de asegurar que el material no presenta desbalances que pudieran causar problemas como el bloqueo biológico del nitrógeno, reducción de oxígeno radicular, exceso de amonio y nitratos y contaminación de fuentes de agua por la lixiviación de materiales no descompuestos apropiadamente (FAO, 2013b).

Los datos revelaron que el método de elaboración, así como las mezclas de residuos biomásicos y la incorporación de MM y LDBIO no afectó la capacidad metabólica de los microorganismos de transformar el material orgánico en forma eficiente, por lo que se concluye que el diseño de los seis tipos de compost es adecuado. Este resultado se explica principalmente porque existió un balance apropiado en la cantidad y calidad de los materiales aportados, hecho que indica que hubo una relación C:N adecuada, que propició un buen balance en el aporte de energía y favoreció el alcance de las condiciones necesarias para que el compostaje ocurriera en la forma deseada.

## 5.2 OBJETIVO ESPECÍFICO 2: EVALUAR LOS PARÁMETROS DE CALIDAD DEL COMPOST ELABORADO.

El sistema de fertilización con compost producido con residuos biomásicos locales, microorganismos de montaña y lodos digeridos de biodigestor es un sistema que exhibe un nivel de viabilidad óptimo desde la óptica de calidad del material terminado. El compost elaborado alcanzó niveles óptimos de estabilidad, madurez, inocuidad, pH y conductividad eléctrica. Estos parámetros no fueron afectados por la incorporación de microorganismos y lodos en el material compostable. Por el contrario, la integración de ambos compuestos en la mezcla produjo una mejora en la concentración de macronutrientes, así como en el contenido de materia orgánica, carbono, humedad y biomasa microbiana con respecto al compost normal. Sin embargo, se determinó que el empleo combinado de ambos insumos puede causar fitotoxicidad en cultivos herbáceos como las cucurbitáceas debido muy probablemente al exceso de Zinc (Zn) y el Boro (B) detectado en los biosólidos provenientes del reactor anaeróbico.

### 5.2.1 AGENTES OPTIMIZADORES DE COMPOST

La integración de MM y LDBIO en la producción de compost es una estrategia basada en los principios de la economía circular (Geissdoerfer *et al.*, 2017), la cual plantea el aprovechamiento eficiente de los residuos y el reciclaje de nutrientes y energía para generar un mayor rendimiento económico y una mejor integridad ambiental en los sistemas productivos. La biooptimización de compost con MM y LDBIO permite el aprovechamiento de materiales locales, favorece el tiempo de residencia de los nutrientes disponibles en el sistema productivo y otorga un valor agregado a la biodiversidad natural del suelo.

Según Suchini Ramírez (2012) los MM son inóculos microbianos con altas poblaciones principalmente de hongos, bacterias y actinomicetos que se encuentran naturalmente en el suelo. Han sido empleados como inóculo de microorganismos benéficos con el objetivo

de optimizar la descomposición de la materia orgánica, fomentando así la liberación de nutrientes disponibles para las plantas (Suchini Ramírez, 2012). Existe evidencia empírica que demuestra que el empleo de MM como biofertilizante ha tenido efectos positivos en el desarrollo de varios cultivos incluyendo tomate, acelga y cacao (Acosta Almánzar, 2012; Campo-Martínez *et al.*, 2014; Medina Flores *et al.*, 2014; Castro Barquero *et al.*, 2015).

Algunos estudios han revelado que la inoculación del compost con microorganismos nativos del suelo ha producido un aumento significativo en la tasa de transformación del material compostable (Kausar *et al.*, 2010; Amira *et al.*, 2011; Mingyan *et al.*, 2011; Parveen & Padmaja, 2011; Wang *et al.*, 2011; Hachicha *et al.*, 2012; Saha *et al.*, 2012). Según Wei *et al.* (2007) la incorporación sistemática de microorganismos en el proceso de compostaje puede aumentar la tasa de descomposición de la materia orgánica, así como disminuir el tiempo de maduración y fomentar el mejoramiento de la calidad final del compost.

Los LDBIO son los sólidos precipitados resultantes del proceso de descontaminación anaeróbica de aguas residuales. Tienen el potencial de incrementar el contenido de materia orgánica y la disponibilidad de N, P y K en el suelo, por lo que han sido utilizados como sustitutos de fertilizantes sintéticos en la agricultura (Mantovi *et al.*, 2005; Kinyua, Zhang, *et al.*, 2016). Los lodos composteados son materiales más estables que los lodos frescos, y presentan la ventaja de que no afectan las características físicas y microbiológicas del suelo (Sciubba *et al.*, 2014; Joo *et al.*, 2015). Aunque el compostaje de los lodos puede resultar en una disminución del contenido de nutrientes aportados al sustrato final (Mantovi *et al.*, 2005; Sreesai *et al.*, 2013), la utilización del material compostado es más segura desde la perspectiva de inocuidad biológica (Sreesai *et al.*, 2013) y estabilidad química (Mantovi *et al.*, 2005).

## 5.2.2 PREFACTIBILIDAD EN EL EMPLEO DE MM Y LDBIO COMO AGENTES OPTIMIZADORES DEL COMPOST

Según los resultados obtenidos en el presente estudio, el empleo de MM y LDBIO como agentes optimizadores de la calidad del compost es factible porque a nivel individual, estos mostraron características adecuadas como material compostable. Además, se detectó que el LDBIO hace un aporte importante de nutrientes y microorganismos eficientes, mientras que los MM, a pesar de tener un bajo contenido tanto de macro y micronutrientes, tienen la capacidad de aportar una cantidad importante de microorganismos para potenciar el proceso de descomposición de la materia orgánica presente en el material compostable. Ambos insumos (MM y LDBIO) presentaron características adecuadas de inocuidad, pH y conductividad eléctrica, lo cual los hace biológicamente seguros y químicamente estables como agentes optimizadores del compost.

En cuanto a la caracterización de los MM que poseen inoculo de microorganismos del suelo de bosque (MMR) y los que no lo contienen (MMP), no se observan atributos que brinden indicios de que estos compuestos sean diferentes en cuanto a las concentraciones de microorganismos eficientes. Sin embargo, debido a la resolución taxonómica limitada de los análisis empleados, se recomienda para futuros trabajos, llevar a cabo pruebas genéticas de mayor resolución, tales como secuenciación genética de próxima generación (NGS, por sus siglas en inglés Next Generation DNA Sequencing (Goodwin *et al.*, 2016)), para detectar si el MMR contiene grupos funcionales de microorganismos que podrían favorecer el proceso de transformación de la materia orgánica de forma más eficiente en sustancias asimilables por los cultivos.

### 5.2.3 COMBINACIÓN DE AGENTES OPTIMIZADORES PARA EL MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD DEL COMPOST

Los análisis de las características de los seis diferentes tipos de compost producidos revelaron que los compost tratados con los agentes optimizadores en forma integrada (MM + LDBIO) son los que presentan preliminarmente las mejores características en cuanto a la concentración de macronutrientes, contenido de materia orgánica y carbono, retención de humedad y concentración de biomasa microbiana.

#### 5.2.4 MACRONUTRIENTES

El compost que contiene ambos agentes optimizadores mostró una mayor concentración de los principales macronutrientes (NPKS). Estos elementos son consumidos en mayores cantidades por las plantas, por lo que son considerados como los principales factores limitantes para el óptimo crecimiento de los cultivos (Hossain *et al.*, 2017). En el caso específico del N, la concentración obtenida en el compost tratado con MM y LDBIO fue un 10.28% mayor a la del compost sin tratar y un 28.66% mayor al límite superior del rango normal reportado por FAO (2013b), donde se indica que la concentración de N en el compost puede oscilar entre 0.3% - 1.5%. El valor obtenido de N también fue superior al reportado por Campitelli & Ceppi (2008), quienes indican que el nivel normal para este macronutriente en el compost puede alcanzar valores >0.6%.

En el caso del P, la concentración obtenida en el compost tratado con MM y LDBIO fue 41.66% superior a la del compost sin optimizar. Los valores registrados se encuentran dentro del rango normal reportado por FAO (2013b) (0.1%-1%) y son comparables con los niveles de P obtenidos por Bernal *et al.* (2017a). El aporte adicional de P en el compost optimizado es importante desde el punto de vista de reciclaje de este nutriente, ya que este es un elemento de disponibilidad limitada en los agroecosistemas (Neset & Cordell, 2012).

Con respecto al K, la concentración alcanzada en el compost tratado con MM y LDBIO fue 39.13% superior a la registrada en el compost que no recibió tratamiento y un 92% mayor al límite superior reportado por FAO (2013b), donde se indica que la concentración de este elemento en el compost convencional puede oscilar entre 0.3% y 1%. En el caso del S, la concentración en el compost optimizado fue 58.82% mayor a la del compost sin optimizar y fue comparable a la reportada por Stoffella *et al.* (2001) para compost tratado con gallinaza, donde el promedio de S alcanzó 0.3%.

La mayor concentración de macronutrientes encontrada en el compost optimizado puede explicarse probablemente por el aporte adicional de nutrientes que realiza los LDBIO (Mantovi *et al.*, 2005; Kinyua, Zhang, *et al.*, 2016), así como por la liberación de nutrientes provenientes de la materia orgánica que realizan los MM durante la etapa de

estabilización del compost (Suchini Ramírez, 2012). El aporte adicional de macronutrientes que puede propiciar el uso integrado de MM y LDBIO es importante porque es una forma de aumentar la disponibilidad de estos elementos para los cultivos, los cuales son fundamentales para el mantenimiento de procesos metabólicos que permiten el adecuado funcionamiento de los sistemas vegetativos. Por ejemplo, el N es el mineral más importante que las plantas obtienen del suelo (Lea & Morot-Gaudry, 2001) ya que interviene en todos los procesos de desarrollo al estar asociado a la formación de aminoácidos, proteínas y ácidos nucleicos (Resendez, 2007). El P es el principal elemento en la transferencia y acumulación de energía necesaria para llevar a cabo los procesos de fotosíntesis y respiración, e interviene de forma significativa en la formación de nucleoproteínas, ácidos nucleicos y fosfolípidos (Kass, 1998). El K es un nutriente móvil que participa en procesos de activación enzimática y neutralización de ácidos orgánicos (Blaya & García, 2003). El S es considerado como un macroelemento (Chesworth, 2007) que participa activamente en procesos de regulación osmótica celular, así como en la biosíntesis de lípidos, aminoácidos, clorofila y carotenos (García & García, 2013).

### 5.2.5 MICRONUTRIENTES

El compost tratado con MM y LDBIO mostró una mayor concentración de dos microelementos, Cu (18.75%) y Zn (20.80%), con respecto al compost no tratado. Estos elementos son consumidos en pequeñas cantidades por las plantas (Gissel-Nielsen & Jensen, 2013). Ejecutan funciones vitales que favorecen el óptimo crecimiento de los cultivos ya que participan en una amplia variedad de procesos de oxidación-reducción y activación enzimática en el caso del Cu, y en la formación y funcionamiento de diversos sistemas enzimáticos en el caso del Zn (García *et al.*, 2013). Las concentraciones de Cu y Zn en el compost tratado con MM y LDBIO fueron 44.66% y 31.67% menores a los promedios obtenidos por Stoffella *et al.* (2001) quienes registraron 103 mg.kg<sup>-1</sup> de Cu y 221 mg.kg<sup>-1</sup> de Zn en compost enriquecido con gallinaza. Otros microelementos, incluyendo el Ca, Mg, Fe, Mn y B, que de igual forma son consumidos en proporciones

menores por las plantas (Chatzistathis, 2014), no aumentaron en sus concentraciones con la incorporación de MM y LDBIO, por lo que se deduce que la integración de estos compuestos no mejora el aporte de micronutrientes al compost final.

Un aspecto importante a considerar es que la mineralización de nutrientes a partir de la descomposición de la materia orgánica por parte de la comunidad microbiana es un proceso gradual que continúa aún después de la incorporación del compost en el suelo (Paulin *et al.*, 2008; Bernal *et al.*, 2017a). Asimismo, puede haber consumo de los nutrientes por parte de los microorganismos (Kaye *et al.*, 1997; Lambers *et al.*, 2008; Barton, 2012), por lo que los valores detectados a la hora de hacer los análisis solo muestran las concentraciones en un momento determinado, las cuales pueden cambiar en el corto plazo. Se recomienda, para efectos de investigaciones futuras, llevar a cabo estudios longitudinales que permitan medir el efecto del compost sobre las características del suelo a largo plazo.

## 5.2.6 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y MICROBIOLÓGICAS

### Materia orgánica, carbono, humedad y biomasa microbiana

La cantidad de materia orgánica en el compost tratado con MM y LDBIO fue 10.89% mayor a la concentración alcanzada en el compost tradicional y 41.95% superior al nivel mínimo recomendado por FAO (2013b) para el compost convencional (>20%). La materia orgánica adicional presente en el compost optimizado proviene del aporte que realiza la incorporación de los LDBIO al material compostable (ver Cuadro 5) y puede tener efectos positivos sobre otros parámetros como la capacidad de almacenamiento de carbono en el suelo, el almacenamiento de nutrientes, el aumento de la actividad microbiana y el mejoramiento de la capacidad de retención de humedad (Bot & Benites, 2005b).

En el caso específico del C, el nivel obtenido en el compost tratado con MM y LDBIO fue 10.89% mayor al del compost no enmendado y fue equivalente a la concentración de este elemento registrado por Stoffella *et al.* (2001) para compost tratado con gallinaza

(19.6%). En relación al contenido de humedad, el compost tratado con MM y LDBIO retuvo un 20.58% más humedad que el compost no tratado, superó el nivel recomendado por FAO (2013b) (30-40%) y se mantuvo dentro del rango óptimo avalado por US Composting Council (2002) (40-50%). El aumento de ambos parámetros (C y humedad) en el compost tonificado con respecto al compost sin optimizar pudo haber estado relacionado al mayor contenido de materia orgánica presente en el compost que recibió los agentes optimizadores.

La biomasa microbiana tiende a estabilizarse en el compost maduro (Petkova & Kostov, 1996; Tiquia *et al.*, 1996). En esta etapa la presencia de hongos y bacterias decrece mientras que la abundancia de actinomicetes aumenta (Antil & Raj, 2012) en respuesta a su capacidad de continuar con la descomposición de sustancias con estructura molecular complejas como la lignina (Kirby, 2005; Brown & Chang, 2014). La biomasa microbiana del compost tratado con MM y LDBIO fue 25% superior a la del compost genérico. Las mayores concentraciones de esta biomasa fueron encontradas en el compost tratado solamente con MM (Vance *et al.*, 1987).

## 5.2.7 OTROS PARÁMETROS DE CALIDAD DEL COMPOST

### Relación C/N

El aumento en las concentraciones de C y N en el compost tratado con MM y LDBIO no generó un desbalance en la relación C:N del sustrato debido a que las cantidades en las que ambos elementos aumentaron en el compost optimizado fueron equivalentes entre sí, ocasionando que no hubieran diferenciación en dicha relación entre el compost optimizado y el compost no tratado. La puntuación obtenida para ambos compost se mantuvo dentro del rango óptimo recomendado por FAO (2013b) (10:1 15:1) y fue inferior al registrado por Bernal *et al.* (2017a) (15.9).

### pH

El pH ácido del MM aplicado al inicio del proceso de compostaje y durante el periodo de maduración del compost no afectó los niveles de pH en ninguno de los compost elaborados. El proceso de compostaje estabilizó el pH del compost terminado en todos los casos. Este parámetro se mantuvo dentro del rango óptimo recomendado por FAO (2013b) (6.5-8.5), levemente por encima del óptimo recomendado por US Composting Council (2002) y Maheshwari (2014) (6-8), y fue comparable con los resultados de Bernal *et al.* (2017a) y Stoffella *et al.* (2001) (~8). La neutralización del pH es uno de los principales beneficios del compostaje (Haug, 1993), ya que el compost con pH cercano a neutro puede ser aplicado a una amplia variedad de cultivos sin causar problemas de acidificación del suelo.

## CE

La conductividad eléctrica es un parámetro importante en la calidad del compost como indicador de la concentración de sales en el sustrato (Maheshwari, 2014), El exceso de sales minerales como el Na puede causar inhibición en el crecimiento de las plantas (Bernal *et al.*, 2017a), lo cual puede ocasionar problemas de germinación y de desarrollo radicular (Stoffella *et al.*, 2001). Todos los compost mantuvieron la CE dentro del rango óptimo reportado por US Composting Council (2002) en 10 mS/cm, lo cual indica que la presencia de sales en los compost se encuentra dentro de los límites aceptables. Este parámetro no fue afectado con la incorporación de MM y LDBIO en el material compostable.

## Inocuidad

La inocuidad del compost no se vio afectada por la incorporación de MM y LDBIO, medida a través de la concentración de *E. coli* en ninguno de los compost elaborados. La presencia de *E. coli* para el compost enmendado con MM y LDBIO fue negativa al igual que en el compost sin optimizar, lo cual se explica por el efecto de higienización que ocurre durante el proceso de compostaje con el aumento de la temperatura a nivel termofílico (Hess *et al.*, 2004). Otro factor que aporta positivamente en la inocuidad del compost optimizado, es el hecho que el MM y los LDBIO son también materiales inocuos (Cuadro 5).

## Estabilidad

La tasa de respiración ( $\text{mg CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ Solidos Volatiles}^{-1} \text{ tiempo}^{-1}$ ) es un indicador de la cantidad de materia orgánica presente en el compost y se encuentra inversamente relacionada al nivel de estabilidad alcanzado en el material biodegradado (Zucconi & de Bertoldi, 1987). A menor respiración, mayor estabilidad debido a que la actividad microbiana baja considerablemente durante el proceso de maduración y estabilización del compost. Según BSI (2011), la tasa de respiración para un compost estable y maduro debe ser  $<6 \text{ mg CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ Solidos Volatiles}^{-1} \text{ día}^{-1}$  después de 20 semanas de compostaje. El valor alcanzado sobre este parámetro para todos los compost elaborados estuvo por debajo del nivel mínimo, y no se muestran indicios de que la estabilidad se vea afectada por la incorporación de MM y LDBIO.

## Madurez

Los resultados obtenidos revelan que, de acuerdo al criterio de madurez por germinación, todos los abonos producidos para este estudio presentan un nivel óptimo de madurez después de 21 semanas de compostaje. Todos los compost superaron el nivel mínimo de germinación para compost maduro, el cual debe ser mayor a 80% (BSI, 2011). No se muestran indicios de que la incorporación de MM y LDBIO afecten la capacidad de maduración del compost.

## 5.2.8 FITOTOXICIDAD

El bioensayo de fitotoxicidad revela que la aplicación de MM y LDBIO como agentes optimizadores del compost en forma individual no produce efectos inhibidores de la germinación ni el crecimiento del cultivo de prueba. Es razonable afirmar que, de acuerdo al sistema producción descrito, estos dos compuestos están libres de fitotoxinas y son seguros para los cultivos.

Por otra parte, el ensayo revela que el empleo integrado de ambos agentes (MM+LDBIO) tiene efectos inhibidores sobre la germinación y el crecimiento del cultivo de prueba, lo

cual indica que podrían haber compuestos tóxicos que reaccionan durante el proceso de compostaje que podrían provocar problemas en la germinación y el desarrollo de los cultivos.

Para poder dilucidar las causas de la fitotoxicidad del compost cuando se aplica MM y LDBIO como agentes optimizadores en forma integrada, es necesario llevar a cabo pruebas más extensivas a nivel químico. Sin embargo, una explicación razonable podría estar ligada al exceso de Zn presente en el compost que contiene LDBIO, lo cual según Stoffella *et al.* (2001), puede provocar inhibición en la germinación y el crecimiento de cultivos sensibles cuando las concentraciones sobrepasan Zn 25 mg.kg<sup>-1</sup>.

La concentración inicial de Zn fue de 1,129 mg.kg<sup>-1</sup> en el LDBIO sin compostear y de 2 mg.kg<sup>-1</sup> en el MM, mientras que la concentración promedio de este elemento fue de 112.3 mg.kg<sup>-1</sup> en los compost sin LDBIO, en contraste a 145.6 mg.kg<sup>-1</sup> en los compost con LDBIO (Camacho-Céspedes *et al.*, 2018) (~30% de diferencia). En ambos casos, la concentración de este microelemento sobrepasa en más del 100% el umbral de fitotoxicidad reportado por Stoffella *et al.* (2001), lo cual podría explicar el efecto inhibitorio observado sobre la germinación y crecimiento en el ensayo experimental.

El origen del exceso de Zn podría explicarse al hecho que la alimentación de los cerdos que aportan las excretas para la formación del LDBIO empleado para el presente estudio es suplementada con aproximadamente 50% de la dieta diaria con concentrados preparados agroindustrialmente. En ese sentido Tam & Tiquia (1994) reportan que las empresas productoras de concentrados agregan Zn para contrarrestar la toxicidad del Cu en el concentrado. Solamente de un 5-10% de del Cu y Zn son absorbidos metabólicamente, por lo que el resto es desechado a través de las excretas (Pampuro *et al.*, 2017).

Las concentraciones de Cu, el cual es un elemento que se adiciona al concentrado para acelerar la digestión y así obtener mejores rendimientos en la crianza de cerdos, para ambos tipos de compost (MM y LDBIO) se mantuvieron por debajo de los niveles de toxicidad según Hsu & Lo (2001) en <976 mg.kg<sup>-1</sup>. Para efectos de minimizar la translocación de estos metales pesados en la cadena trófica, es importante utilizar una

dieta baja en concentrados comerciales en la alimentación de los animales y así reducir la incidencia de metales pesados en el sistema productivo.

El exceso de B es otro factor que podría causar inhibición en la germinación y el crecimiento de los cultivos cuando las concentraciones sobrepasan los B  $2.5 \text{ mg.kg}^{-1}$  (Stoffella *et al.*, 2001). El MM registra una concentración inicial de  $1 \text{ mg.kg}^{-1}$  mientras que en el LDBIO la cantidad reportada es de  $10 \text{ mg.kg}^{-1}$  (Camacho-Céspedes *et al.*, 2018). El promedio de la concentración de este micronutriente en los compost tratados con LDBIO es  $\sim 10\%$  mayor a los compost que están libres de este biosólido. En ambos casos la concentración de este elemento es más del 100% del umbral máximo recomendado por Stoffella *et al.* (2001), por lo que dicho exceso podría ser otra causa de la fitotoxicidad detectada en el compost enmendado con MM y LDBIO.

La presencia de ácidos orgánicos resultantes de la descomposición de materia orgánica, tales como ácido acético, butírico, propiónico y valérico, podría ser otra de las causas de la fitotoxicidad detectada en el compost tratado con MM y LDBIO (Stoffella *et al.*, 2001; Varnero *et al.*, 2007). El ácido acético en particular es el ácido orgánico que puede causar un mayor nivel de fitotoxicidad en cultivos sensibles como pepino y berros (Goh *et al.*, 1986; Stoffella *et al.*, 2001).

Bernal *et al.* (2017a) reporta que una de las principales causas de la fitotoxicidad del compost es la presencia de sales en el sustrato, lo cual puede ser detectado a través de la lectura de la conductividad eléctrica. Este parámetro debe permanecer en  $\sim 10 \text{ mS/cm}$  según US Composting Council (2002). Las puntuaciones para esa variable en el caso del MM fueron de CE  $7.5 \text{ mS/cm}$ , mientras que el LDBIO alcanzó  $6.6 \text{ mS/cm}$  (Camacho-Céspedes *et al.*, 2018). En el caso de los compost que no contienen biosólidos (LDBIO) la CE promedio registró  $9.6 \text{ mS/cm}$  mientras que el que sí contiene ambos agentes optimizadores, la CE alcanzó  $9.5 \text{ mS/cm}$ , por lo que se descarta que el exceso de sales, utilizando el parámetro de CE como proxy, sea el factor que esté causando la fitotoxicidad detectada.

Utilizando los PRSG %, CCR%, IG%, IC% como parámetros discriminatorios de fitotoxicidad, se concluye que el empleo individual de MM y LDBIO como agentes optimizadores del compost en las concentraciones utilizadas, no tiene un efecto inhibitor

en la germinación y el crecimiento del cultivo de prueba (*Cucumis sativus* L.). Se infiere por deducción que la utilización individual de estos compuestos no produce un efecto fitotóxico sobre cultivos sensibles, por lo que es seguro, desde el punto de vista de fitotoxicidad, emplearlos como agentes optimizadores del compost. Empero, el empleo de estos compuestos en forma integrada (MM+LDBIO) como agentes optimizadores del compost provocó una disminución significativa de la germinación y el crecimiento inicial del cultivo de prueba, lo cual indica que podrían haber compuestos tóxicos que reaccionan durante el proceso de compostaje que podrían provocar problemas en la germinación y el desarrollo de los cultivos. Este comportamiento puede ser explicado por el efecto del exceso de Zn y B detectado en este tipo de compost o por la presencia de sustancias provenientes del proceso de descomposición de la materia orgánica causantes fitotoxicidad como lo son el ácido acético, butírico, propiónico y valérico. Se recomienda llevar a cabo procesos de investigación utilizando técnicas de química analítica especializadas para determinar las causas específicas de la fitotoxicidad detectada y realizar otros ensayos experimentales para puntualizar los umbrales específicos donde la conjugación de estos dos compuestos se convierte en sustancias fitotóxicas. De igual manera, debido a que el compost optimizado con MM+LDBIO presenta buenas características en cuanto a su calidad (Camacho-Céspedes *et al.*, 2018), se recomienda llevar a cabo otras pruebas para detectar si el efecto fitotóxico se mantiene sobre otros cultivos y sobre otras etapas de desarrollo más avanzadas a la germinación y crecimiento inicial.

### 5.3 OBJETIVO ESPECÍFICO 3: VALORAR EL EFECTO DEL COMPOST PRODUCIDO SOBRE EL DESARROLLO DE ALMÁCIGOS DE CAFÉ.

El sistema de fertilización con compost producido con residuos biomásicos locales, microorganismos de montaña y lodos digeridos de biodigestor es un sistema que exhibe un nivel de viabilidad óptimo desde la perspectiva de aporte al mejoramiento del rendimiento en el crecimiento del almacigo de café. El sistema de fertilización produjo plántulas que alcanzaron un desarrollo de más de un 200% del peso seco en

comparación con las que no recibieron ningún tipo de fertilización. Este nivel de desarrollo fue equivalente al de las plántulas expuestas al sistema de fertilización más intensivo que utilizan los productores locales, el cual emplea una mezcla de vermicompost y abono sintético NPK (10:30:10) en el sustrato de crecimiento. El sistema propuesto produjo plántulas con un estado fitosanitario óptimo, el cual fue también equivalente al sistema de fertilización más intensivo. El costo de producción por plántula bajo el sistema propuesto fue un 10% menor al costo de producción del sistema más intensivo. Esta diferencia en el costo de producción unitario, representa un ahorro en el establecimiento de nuevas plantaciones de café de  $\phi$ 150,800 por hectárea asumiendo una densidad de plantación de 5,200 plántulas por esa misma unidad de medida. Contextualizado a las condiciones de la región de Monteverde, donde el tamaño de los sistemas agroforestales de café con sombra puede oscilar alrededor de 3 hectáreas, ese nivel de ahorro puede traducirse a  $\phi$ 450,000 en el año de establecimiento, monto que representa un 40% de los ingresos que el productor potencialmente recibiría por la venta del grano en el primer año de cosecha.

Tomando en cuenta un sobreprecio del 33% del valor de venta de almácigo convencional, el sistema de fertilización propuesto, presentó una relación costo beneficio de 0.98 en comparación con el sistema de fertilización con vermicompost y abono sintético, el cual registró una relación de 1.09, hecho que indica que el sistema de fertilización propuesto logra cubrir los costos de producción del almácigo, mientras que el sistema convencional no lo logra, lo cual se explica principalmente por el mayor costo que representa la adquisición y el transporte de insumos externos.

El desarrollo de las plántulas expuestas al sistema de fertilización propuesto es equivalente al desarrollo del almácigo fertilizado con compost puro sin los agentes optimizadores, lo cual indica que la mejora en la calidad del compost que produce la incorporación de microorganismos y lodos en el proceso de compostaje, no se refleja en un mejor rendimiento del cultivo de almácigo. Este hallazgo podría ser explicado por varias razones incluyendo en primer lugar que las dosis aplicadas de estos materiales no fueron suficientes para producir mejoras significativas sobre el desarrollo del cultivo con respecto al nivel de crecimiento que produjo el compost puro. La presencia de

sustancias orgánicas o inorgánicas inhibitorias del crecimiento en el sustrato, el consumo de nutrientes por parte de los microorganismos, o el estado de solubilidad de los compuestos para la adecuada absorción por parte del sistema radicular de las plantas, pueden ser otros factores que ayuden a explicar el resultado obtenido. En todo caso, el empleo de dosis mayores de LDBIO y MM, podría proveer el suministro de nutrientes y las condiciones de fertilidad necesarias para maximizar el crecimiento de los cafetos, por lo que sería valioso realizar análisis posteriores para identificar los ajustes necesarios que pueden implementarse con el fin de extender el alcance de los resultados obtenidos.

### 5.3.1 PESO SECO TOTAL, RADICULAR, LEÑOSO Y FOLIAR

La incorporación de compost en el sistema de producción de almácigo de café es un mecanismo efectivo para aumentar el desarrollo y la vitalidad de este cultivo. Independientemente de si las plántulas reciben vermicompost, compost puro o compost optimizado con MM y LDBIO, el nivel de desarrollo promedio puede aumentar entre 150 y 280% con respecto a no utilizar compost del todo (Ver Figura 20). Este hallazgo viene a reconfirmar el alto potencial que tiene la tecnología del compostaje como un mecanismo efectivo para optimizar la agricultura orgánica, ya que la integración del compost a los sistemas de producción no solamente genera rendimientos deseables, sino que también permite alcanzar otros beneficios ambientales como el reciclaje de nutrientes, el manejo apropiado de desechos y la recuperación de la integridad ecológica y la fertilidad natural del suelo (Erhart & Hartl, 2010; Schloter, 2014; Bernal *et al.*, 2017b; De Corato *et al.*, 2018; Tsvetkov *et al.*, 2018).



Figura 20. Efecto de la fertilización de almácigo de café con compost. Las plántulas de la izquierda fueron fertilizadas, mientras que las de la derecha no recibieron ningún tipo de fertilizante. 2018.

Los resultados obtenidos con respecto al mejoramiento de los rendimientos en el desarrollo del almácigo de café a partir del empleo del compost son congruentes con lo reportado en la literatura en cuanto a los efectos positivos del compost en los sistemas de producción de almácigo. Por ejemplo, Rosenani *et al.* (2016), reporta que el empleo de compost proveniente de bagazo de palma aceitera en viveros de ese mismo cultivo produjo un mejoramiento de hasta 70% en el crecimiento de las plántulas, mientras que Posada Tobón & Osorio (2003) reporta diferencias positivas de hasta un 150% en el peso seco de las plántulas de café fertilizadas con compost derivado de pulpa de ese cultivo con respecto a las no fertilizadas.

La incorporación de compost en el sistema de fertilización tiene una mayor influencia sobre el desarrollo foliar de los cafetos (ver Figura 21 y 22). En este segmento, el

aumento en desarrollo con respecto al control (T1), osciló entre 200 y 365%, mientras que en el desarrollo radicular y en la parte leñosa, el rango de aumento se mantuvo entre un 130 a un 260%. El mejoramiento en el desarrollo de la parte foliar es beneficioso en el sistema de producción de almácigo de café, especialmente cuando el follaje presenta buenas características fitosanitarias. Este es uno de los principales medios por el cual las plantas tienen un mayor potencial de crecimiento en las etapas consecuentes, en vista de que al haber un mayor desarrollo, se aumenta la capacidad fotosintética, lo cual eventualmente podría traducirse a mejores rendimientos en la productividad del cultivo.

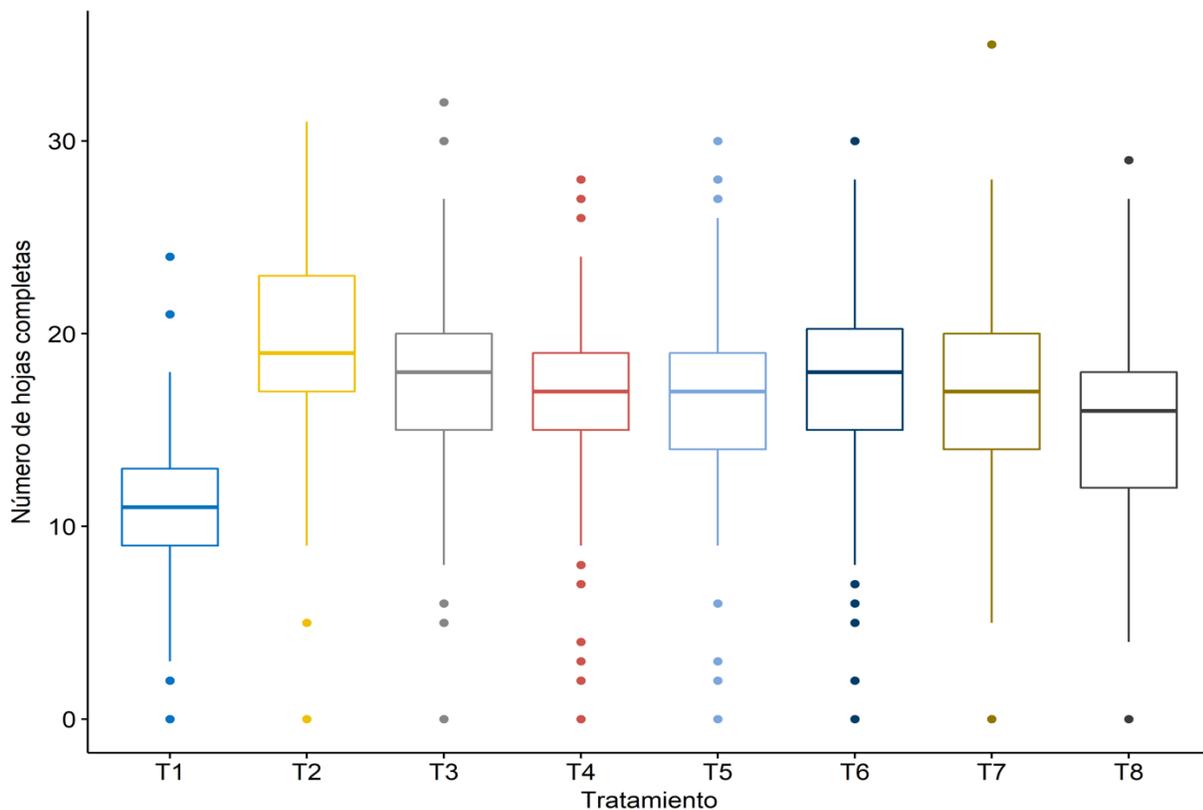


Figura 21. Numero de hojas por tratamiento. T1 suelo sin fertilizante, T2 humus de lombriz y NPK, T3 compost puro, T4 compost con MMR, T5 compost con MMP, T6 compost con LDBIO, T7 compost con MMR y LDBIO A y T8 compost con MMR y LDBIO B. 2018. Las cajas representan el agrupamiento del 50% de los datos (segundo y tercer cuartil) y la línea interna, la mediana.

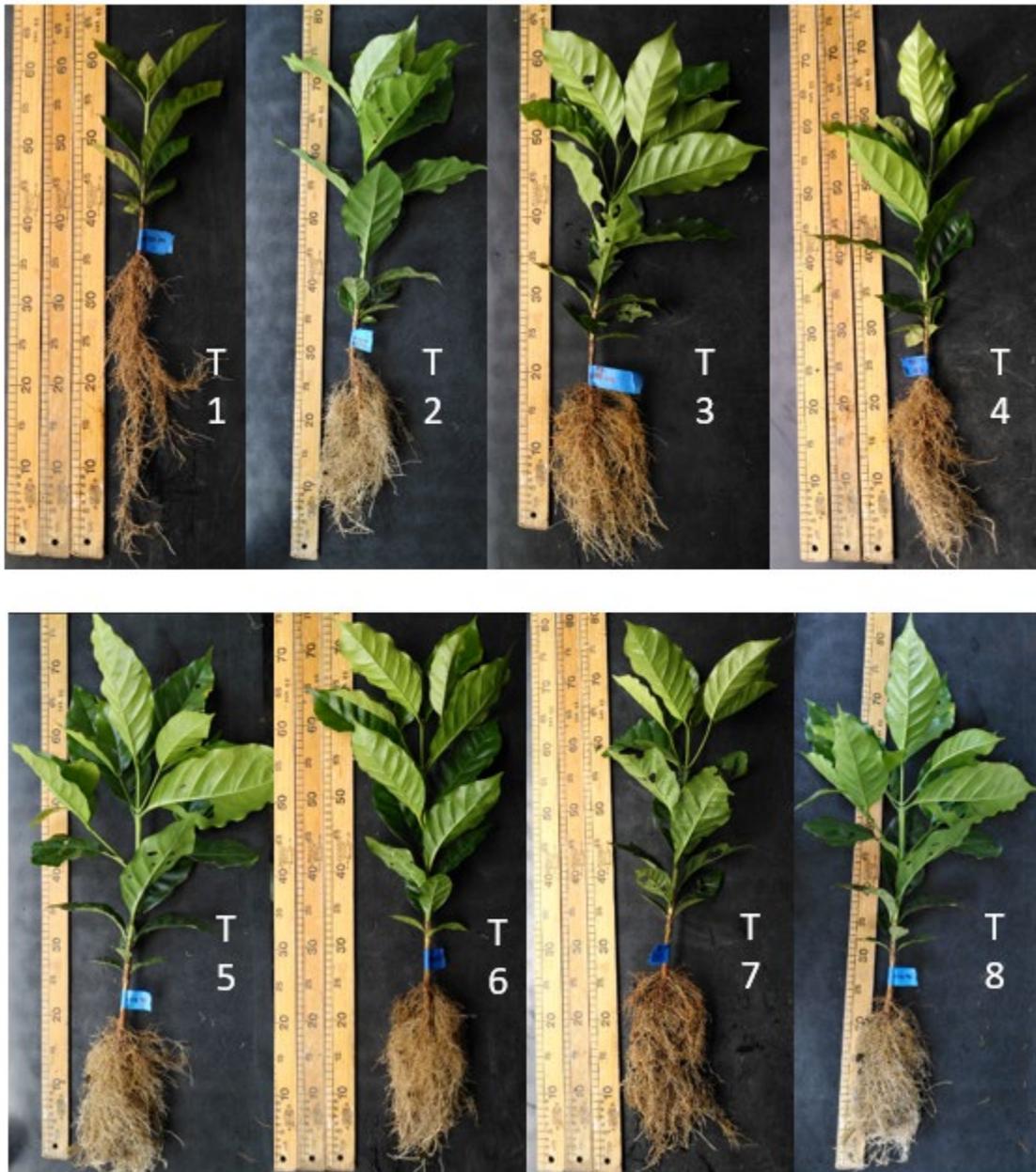


Figura 22. Desarrollo de las diferentes partes de las plántulas de café según cada tratamiento. T1 suelo sin fertilizante, T2 humus de lombriz y NPK, T3 compost puro, T4 compost con MMR, T5 compost con MMP, T6 compost con LDBIO, T7 compost con MMR y LDBIO A y T8 compost con MMR y LDBIO B. 2018.

El tratamiento T8 generó el menor rendimiento en el desarrollo de los cafetos a nivel radicular, leñoso y foliar. Este comportamiento se debe a la menor disponibilidad de nutrientes presentes en el compost elaborado con brosa de café (ver Cuadro 6), por lo

que para lograr un mayor rendimiento con este residuo, es recomendable mezclarlo con otros desechos con el fin de aumentar la diversidad y cantidad de nutrientes disponibles para los cultivos. Los otros tratamientos experimentales, incluyendo T4 al T7, que no contienen compost derivado de brosa de café, presentaron rendimientos que duplicaron el nivel de crecimiento del almácigo con respecto al control.

El tratamiento T2, el cual conjuga unos de los mejores tipos de compost disponibles en el mercado (humus de lombriz californiana) con aplicaciones periódicas de fertilizante sintético según las recomendaciones del ICAFE (2013), presenta, como es de esperar, los mejores rendimientos en el crecimiento de las plántulas de todo el experimento, por lo que es considerado el sistema de fertilización más intensivo que pueden utilizar los productores de café actualmente. Las diferencias observadas se deben muy probablemente a la nutrición química adicional que aporta el abono sintético. Este tratamiento también presenta la mayor varianza de resultados, así como el mayor error y desviación estándar del experimento, lo cual indica que existe un mayor nivel de incertidumbre en los rendimientos alcanzados al haber una mayor variabilidad y dispersión en los datos, así como un menor nivel de precisión.

Los compost experimentales optimizados con MM y LDBIO que no contienen brosa de café (T4 al T7) produjeron plántulas con prácticamente el mismo nivel de desarrollo al sistema de fertilización más intensivo (T2). Aunque hubo diferencias entre dichos tratamientos, éstas no sobrepasaron el nivel crítico (5 g), por lo que es razonable considerarlos como equivalentes entre sí. La varianza de los resultados de rendimiento de estos tratamientos fue entre 21 y 43% menor a la del T2, mientras que la desviación estándar (dispersión) y el error típico (precisión) oscilaron entre 11 a 25% para ambos casos por debajo de las puntuaciones para esos parámetros sobre ese mismo tratamiento. Esto indica que los rendimientos en dichos tratamientos experimentales fueron no solamente equivalentes a los del T2, sino que también mostraron un comportamiento más estable, hecho que es altamente deseable en los sistemas de producción, ya que los productores adquieren la capacidad de obtener material de alta calidad en forma más constante y precisa.

Las diferencias en el peso seco radicular y leñoso entre el tratamiento T2 y los tratamientos experimentales antes citados (T4-T7) no fueron relevantes, al no alcanzar los mínimos críticos para ambos casos. Las mayores diferencias entre estos tratamientos se dieron a nivel foliar, en donde en todos los casos, excepto en el tratamiento T6, dichas diferencias fueron mayores al mínimo crítico. Esto indica que el principal efecto de la mayor concentración de nutrientes que presenta el T2 se refleja en un mejor desarrollo del follaje en este cultivo. Una estrategia de optimización de los compost experimentales debería ir dirigida a incrementar el contenido de nitrógeno y fósforo para favorecer el desarrollo foliar.

El mejoramiento de la calidad del compost que produce la integración de MM y LDBIO no se refleja en un mayor crecimiento de las plántulas expuestas a los tratamientos donde se utilizó compost optimizado con dichos agentes. Las diferencias en el desarrollo del almácigo entre el tratamiento T3 (compost sin optimizar) y los tratamientos experimentales que no contienen compost derivado de brosa de café (T4-T7) no fueron relevantes ya que se mantuvieron por debajo del nivel mínimo (5 g). Esto indica que el desarrollo de las plantas sometidas a dichos tratamientos tanto a nivel general, como a nivel de los diferentes segmentos de las plántulas, fue prácticamente el mismo.

Este hallazgo puede tener varias explicaciones, la primera de ellas sugiere que el compost optimizado no hizo un aporte suficiente de nutrientes en el sustrato de crecimiento para suplir las condiciones necesarias para producir un aumento significativo en el desarrollo de las plántulas. Aunque la incorporación de dichos agentes produjeron mejoras sobre algunos de los parámetros evaluados en los sustratos de crecimiento (Cuadro 13), los resultados de crecimiento del almácigo evidencian que, para poder aumentar el potencial productivo de los compost experimentales por encima de los niveles alcanzados con el compost puro, podría ser necesario llevar a cabo ajustes en el diseño del sistema de fertilización, tal como lo puede ser aumentar las dosis aplicadas de los agentes optimizadores, o buscar otros agentes que hagan un aporte estratégico de nutrientes.

Otra posible explicación del hallazgo de que no se registrara un mayor crecimiento en las plántulas expuestas al compost tratado con MM y LDBIO, podría estar relacionada a

la presencia de sales en el sustrato. Cuando las sales como Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>+</sup> y Mg<sup>+</sup> ocupan el área de intercambio catiónico de las raíces, la presión osmótica aumenta en el suelo justo en el exterior de sistema radicular, impidiendo que el flujo de agua hacia la planta ocurra de forma eficiente, lo cual puede limitar la capacidad del cultivo para absorber e intercambiar nutrientes entre sus diferentes partes, y así impedir que haya un mayor crecimiento (Spellman *et al.*, 2007). La presencia de sales en el suelo se determina utilizando la lectura de la conductividad eléctrica, la cual según Andrades *et al.* (2014) debe mantenerse en menos de 2 mS/cm para que el sustrato esté libre de problemas por salinidad. Según la lectura de conductividad obtenida para los diferentes sustratos, la cual fue de 2.83±0.37 mS/cm (n=6), la presencia de compost, independientemente del tipo, aumenta la salinidad provocando que el suelo se vuelva ligeramente salino.

Aunque no se puede descartar por completo que el aumento de la salinidad provocada por la presencia del compost en el suelo sea una de las causas de que no se registrara un mayor crecimiento del cultivo expuesto al compost de mayor calidad, los niveles de salinidad detectados no son lo suficientemente altos como para que el exceso de sales sea considerada como la causa principal de la falta de crecimiento observado. Adicionalmente, la lectura de CE del suelo enmendado con el tratamiento convencional intensivo fue la más alta en todo el experimento (4.6 mS/cm), por lo que si hubiera sido la salinidad el causante del menor rendimiento, las plántulas expuestas a dicho tratamiento probablemente no hubieran alcanzado el nivel de crecimiento logrado, hecho que revela la necesidad de llevar a cabo más investigación para determinar el efecto de la desalinización del sustrato sobre el crecimiento del cultivo (Illera-Vives *et al.*, 2014).

El exceso de Zn y de Fe detectado en el sustrato de crecimiento pudo haber sido otra de las razones que impidieron que hubiera un mayor crecimiento en las plántulas expuestas al compost experimental (Stoffella *et al.*, 2001; Juárez *et al.*, 2008). Estas sustancias pueden tener efectos fitotóxicos sobre los cultivos cuando se presentan en concentraciones mayores a 10 mg/L en el caso del Zn y 50 mg/L en caso del Fe (Molina, 2007). En ese sentido, los datos revelaron que todos los tratamientos experimentales obtuvieron concentraciones mayores al umbral recomendado. En el caso del Zn, el promedio de las concentraciones en los tratamientos experimentales fue de 12.78±1.3

mg/L(n=6), mientras que en el caso de Fe el promedio fue de  $89.16 \pm 6.61$  mg/L(n=6). Las puntuaciones para ambos elementos del tratamiento más intensivo se mantuvieron dentro del rango óptimo, hecho que evidencia que la fitotoxicidad causada por el exceso de estos dos elementos podría ser una causa razonable de la inhibición del crecimiento detectada en dichos tratamientos.

El origen del Zn, es muy probablemente del exceso de este elemento presente en los biosólidos del biodigestor. Este es alimentado con excretas de cerdo que reciben una parte de su dieta con alimentos concentrados producidos agroindustrialmente, los cuales normalmente son suplementados con Zn para contrarrestar la toxicidad del Cu (Tam *et al.*, 1994). El exceso de Fe proviene muy probablemente del suelo de la finca utilizado en el ensayo, el cual registró una concentración dos veces mayor rango óptimo, hecho que según Molina (2007) es un rasgo prevalente en los suelos de origen volcánico que puede aumentar el riesgo de toxicidad.

Otras posibles causas que podrían explicar las razones de que no hubiera un mayor rendimiento del cultivo a pesar del mejoramiento de la calidad de los abonos podrían estar relacionadas a la ausencia de biodisponibilidad de los nutrientes como compuestos solubles directamente absorbibles por las plantas ( $K^+$ ,  $NO_3^-$ ,  $PO_4^{=}$ ,  $Ca^{2+}$ ); a la presencia de sustancias orgánicas resultantes del proceso de descomposición de la materia orgánica que podrían causar fitotoxicidad, tales como ácido acético, butírico, propiónico y valérico (Stoffella *et al.*, 2001); al consumo de los nutrientes por parte de los microorganismos (Kaye *et al.*, 1997; Lambers *et al.*, 2008; Barton, 2012), o que al momento de la aplicación hubiera un factor desconocido que obstaculizara la adecuada absorción de los nutrientes. En todo caso, resulta un problema complejo dilucidar las causas específicas que explican las razones por las cuales no hubo un mayor crecimiento del cultivo a pesar del mejoramiento de las condiciones de fertilidad del sustrato. Esto sugiere que es necesario llevar a cabo más investigaciones considerando tanto pruebas de campo como de laboratorio.

Para efectos de lograr el objetivo de llevar la calidad del abono a un nivel más avanzado, uno de los mecanismos más inmediatos que podría emplearse es la aplicación de una mayor cantidad de LDBIO en el compost. Este compuesto, a como se puede observar

en los análisis químicos efectuados tanto al material puro como a los compost que lo incorporan, presenta un contenido valioso de macronutrientes, así como de materia orgánica y microorganismos efectivos. Se recomienda llevar a cabo un experimento de crecimiento a posteriori para determinar la dosis en la que el empleo de este material en el compost, puede generar rendimientos superiores a 18 g por plántula de almácigo de café sin causar fitotoxicidad, considerando que la dosis de LDBIO en el experimento elaborado para el presente estudio representa un 8% del peso fresco de la mezcla de materiales utilizados para la elaboración del compost.

Aunque existe evidencia empírica que sugiere que el MM ha producido mejoras en los sistemas de producción como biofertilizante (Acosta Almánzar, 2012; Campo-Martínez *et al.*, 2014; Medina Flores *et al.*, 2014; Castro Barquero *et al.*, 2015) y como agente para el mejoramiento de la calidad del compost (Wei *et al.*, 2007; Kausar *et al.*, 2010; Amira *et al.*, 2011; Mingyan *et al.*, 2011; Parveen *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2011; Hachicha *et al.*, 2012; Saha *et al.*, 2012), los datos del presente estudio indican que la incorporación de este compuesto tiene un efecto neutro sobre los niveles de calidad del compost. No se detectan mejoras ni detrimentos en las características del compost elaborado con este compuesto. Tampoco se detectan diferencias significativas en el crecimiento de las plantas que fueron expuestas al compost elaborado con MM, ni se identificaron diferencias ( $t = 0.46339$ ,  $gl = 397.9$ ,  $p\text{-valor} = 0.6433$ ), a nivel del crecimiento de las plántulas, entre las que fueron fertilizadas con compost inoculado con MMR (elaborado con humus y hojarasca del bosque) y con MMP (placebo, sin humus y hojarasca forestal). Esto sugiere que la incorporación intencional de los microorganismos del suelo del bosque en el proceso de compostaje no tiene un efecto detectable sobre la calidad del compost terminado, hecho que podría explicarse porque las dosis empleadas en el experimento no fueron suficientes como para producir cambios significativos en la calidad del fertilizante, por lo que se recomienda llevar a cabo ensayos de crecimiento, con diferentes aplicaciones de MM, para determinar las dosis apropiadas para generar cambios que puedan traducirse a la mejor productividad del agroecosistema.

### 5.3.2 ESTADO FITOSANITARIO

Los resultados obtenidos en el experimento de crecimiento de las plántulas de café revelan que la salud y la vitalidad, así como la propensión y susceptibilidad a plagas y enfermedades son factores que pueden ser controlados y optimizados desde el punto de vista de nutrición, lo cual es consistente con lo reportado por otros autores como Nicholls *et al.* (2006) Huber & Haneklaus (2007) y Larkin (2015). Las plantas más robustas y mejor desarrolladas presentan un mejor estado fitosanitario y una mejor vitalidad y son menos propensas a ser invadidas por plagas y enfermedades. Esto las convierte en mejores candidatas para alcanzar una mejor adaptación al campo y producir mejores rendimientos en las plantaciones.

Los datos aportan evidencia de que el compost, independiente del tipo que se aplicó en el experimento, es un biofertilizante que tiene el potencial de brindarle a las plántulas los nutrientes y las condiciones de fertilidad necesarias para lograr un desarrollo óptimo y un estado fitosanitario deseable (ver Figura 23).



Figura 23. Diferencias sobre el estado fitosanitario de plantas biofertilizadas con compost (superior) y sin compost (inferior). 2018.

No se encontraron diferencias significativas en cuanto al estado fitosanitario y la propensión a producir plántulas con características indeseables entre los tratamientos experimentales (T4-T7) con respecto al tratamiento más intensivo T2. La incorporación de MM y LDBIO tampoco afectó la capacidad del compost de producir plántulas con estado fitosanitario óptimo. El T8 sí presentó una propensión significativa de producir plántulas con características no deseadas, hecho que se explica por haber generado una mayor cantidad de plántulas con desarrollo menor al de los otros tratamientos experimentales, factor que está ligado al menor aporte de nutrientes que realiza el compost elaborado con brosa de café.

### 5.3.3 ANÁLISIS DE COSTOS DE PRODUCCIÓN Y RELACIÓN COSTO/BENEFICIO

Los costos de producción de almácigo de café aumentan significativamente conforme aumenta la complejidad del sistema de producción. Los principales factores que causan variación en la estructura de costos son el valor de los insumos, el transporte y la mano de obra que se requiere para llevar a cabo el proceso de producción. El empleo de insumos externos, tanto procesados (p.ej. abono sintético, vermicompost) como materia prima para la elaboración de abonos (p.ej. brosa de café, estiércol, lodos), no solo aumentan el costo de producción por la adquisición de los insumos propiamente, sino que también aumentan el costo de transporte. Por ese motivo, una de las recomendaciones que se derivan del presente estudio es buscar la eficiencia económica no solamente desde el punto de vista de utilizar insumos y residuos locales para favorecer la recuperación de nutrientes, sino también procurar que dichos materiales estén disponibles a distancias que no impliquen altos costos de transporte.

El sistema de fertilización que utiliza brosa de café como materia prima para el compost (T8) es el más complejo de todos y por lo tanto el más costoso, ya que implica la adquisición y el transporte del material fresco desde otros sectores fuera de la finca, así como la mano de obra para la elaboración del abono. El costo de producción bajo este sistema es un 4.3% mayor al siguiente sistema de producción más complejo, que viene a ser el del tratamiento T2. En este sistema, el principal costo proviene del transporte de

los insumos, los cuales tienen la ventaja de que no necesitan ser procesados, por lo que no se tiene que incurrir en costos de mano de obra, más que los que implica la preparación y el mantenimiento de las plántulas.

El costo de producción de almácigo que utilizan compost elaborados in situ (T3-T7), son los más bajos y representan entre un 10 y un 20% de ahorro con respecto al tratamiento T2. En estos tratamientos el principal costo de producción es la mano de obra, la cual representa en promedio un 85% del costo total de producción, y se deriva de la mano de obra necesaria para la producción del abono, así como la que se tiene que invertir para la preparación y el cuidado del almácigo. En ambos casos, los productores de almácigo podrían diluir el costo de la mano obra por unidad producida, aumentando el volumen de producción de abono o de almácigo, el cual podría ser vendido a otros productores locales, para recuperar parte de la inversión.

El costo de producción del sistema convencional que se utiliza en la región de Monteverde (T2) es 45% mayor al costo del almacigo convencional reportado por ICAFE (2017) como promedio para todo el país, mientras que el costo de producción de los sistemas orgánicos T3 al T7 (sin brosa) oscilaron entre un 15 y un 30% por encima del costo oficial.

El costo de fertilización de las plántulas se mantuvo constante entre los tratamientos que utilizaron compost elaborado en el sitio (T3 al T7). Este costo representó entre un 29 y un 38% del costo total de producción bajo esos tratamientos. En los tratamientos donde se emplearon insumos externos, el costo de fertilización aumentó alrededor del 45%, lo cual estuvo directamente ligado al costo que implica el transporte de los insumos.

El costo total por gramo de peso seco producido fue menor en los tratamientos más simples de elaborar (T3 y T6) (ver Figura 24), los cuales conllevaron la menor inversión en materiales, insumos y mano de obra. Estos mismos tratamientos presentaron la mayor eficiencia en el costo de fertilización por gramo de peso seco producido. En ambos casos, el costo se mantuvo en menos de 5 colones por plántula, lo cual representa un ahorro en fertilización de cerca de 150% por unidad de peso producida con respecto al costo de fertilización por gramo del T8, y de un 45% con respecto a ese mismo costo en relación al T2. Los sistemas de producción de almácigo orgánico ofrecen a los caficultores

plántulas de óptima calidad a un menor costo y la posibilidad de certificar su plantación como orgánica desde la etapa de establecimiento del sistema productivo.

La relación costo beneficio es un indicador que compara la relación entre la inversión que se hace para producir un bien o servicio y el retorno de esa inversión. Normalmente, el retorno de la inversión corresponde al precio de venta del producto, el cual idealmente debe estar asignado por un mercado local. Sin embargo, en Monteverde, a como lo es en el resto del país, no existe un mercado local para la transacción de almácigo orgánico, por lo que el precio de venta utilizado para el cálculo de la relación costo beneficio, fue el indicado por ICAFE (2017). Utilizando este parámetro, se obtienen que las relaciones C/B son superiores a 1 (ver Figura 25) en todos los tratamientos experimentales, lo cual indica que el nivel de costos de producción supera el valor comercial del producto por lo que no habría viabilidad económica en producir el almácigo si fuera para venta.

Cuando se utiliza un precio de venta más apropiado para el almácigo orgánico que reconoce el valor agregado de este tipo de bienes y servicios, el cual hipotéticamente podría ser un tercio mayor al precio de venta corriente de mercado, el impacto en la relación costo beneficio podría mejorarse para el caso de los sistemas de fertilización que emplean abonos orgánicos elaborados in situ con residuos biomásicos cercanos, a un nivel de eficiencia económica que podría compensar la inversión (ver Figura 25), estrategia que es deseable bajo un modelo de producción para autoabastecimiento.

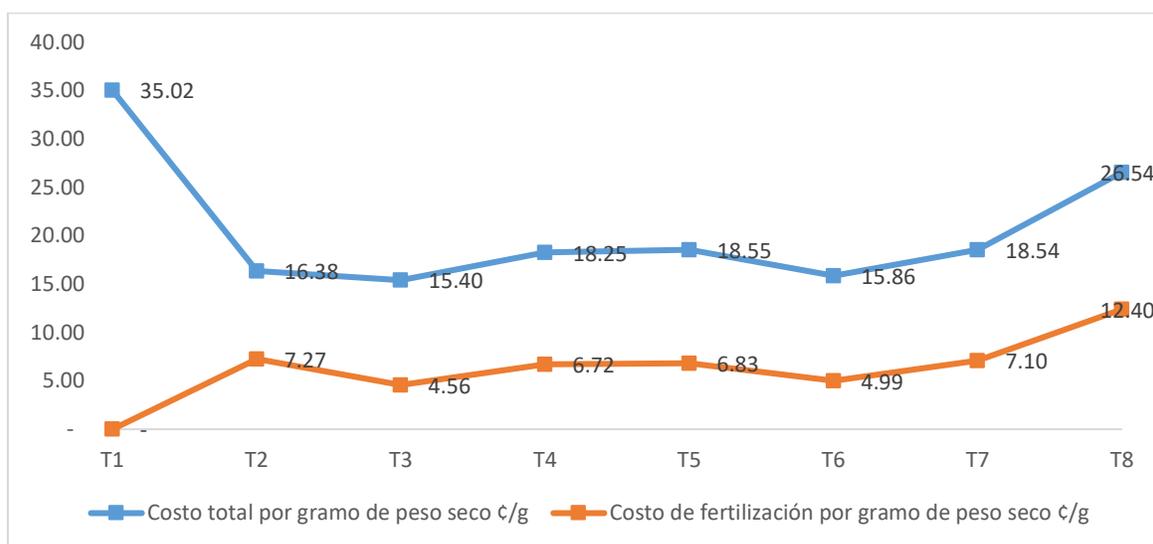


Figura 24. Costos de producción por unidad de crecimiento. T1 suelo sin fertilizante, T2 humus de lombriz y NPK, T3 compost puro, T4 compost con MMR, T5 compost con MMP, T6 compost con LDBIO, T7 compost con MMR y LDBIO A y T8 compost con MMR y LDBIO B. 2018.

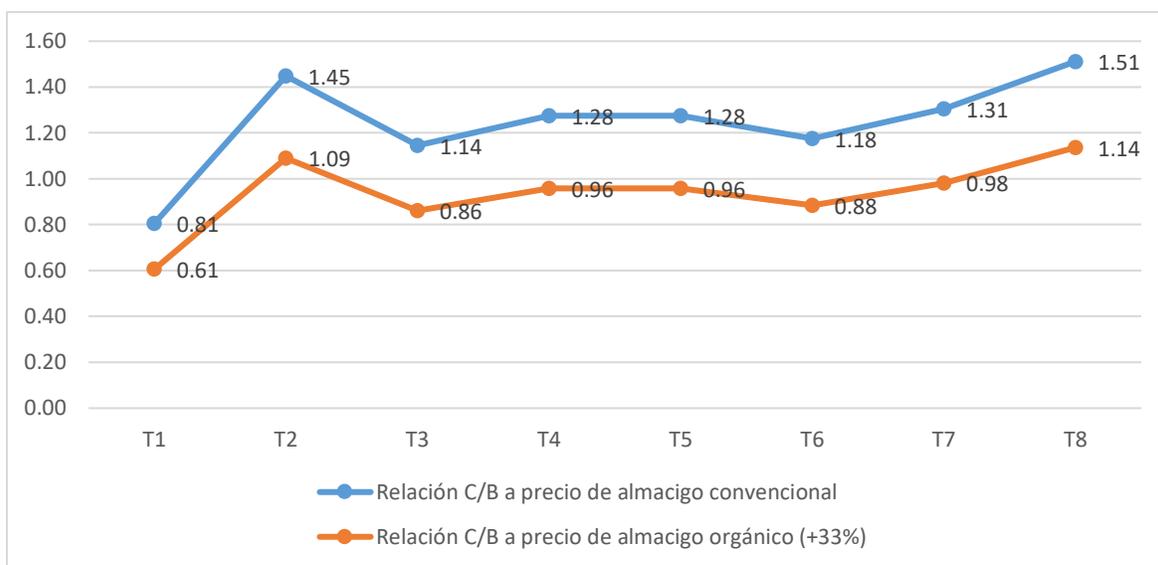


Figura 25. Relaciones costo beneficio a dos diferentes precios potenciales de venta del almácigo. T1 suelo sin fertilizante, T2 humus de lombriz y NPK, T3 compost puro, T4 compost con MMR, T5 compost con MMP, T6 compost con LDBIO, T7 compost con MMR y LDBIO A y T8 compost con MMR y LDBIO B. 2018.

Bajo ambos modelos de cálculo de la relación costo beneficio, se aprecia que los sistemas de producción orgánica más simples (T3 y T6), los cuales contienen compost puro y compost optimizado con lodos de biodigestor respectivamente, son los que tienen una mejor relación, debido a que existe una mejor eficiencia en los costos de producción. Los resultados obtenidos revelan que el empleo de estos sistemas de producción de almácigo de café (T3 y T6), pueden generar ahorros cercanos a los 300,000 colones por hectárea (5,200 plántulas/ha) en el establecimiento de nuevas plantaciones con respecto al T2, lo cual representa un ahorro de cerca del 20% del costo de instalación.

El empleo del sistema que integra microorganismos y lodos sin brosa de café (T7), presenta una relación costo beneficio equivalente a los dos sistemas más eficientes en

términos de costos y productividad (T3 y T6). El costo de producción por plántula para este sistema fue un 10% menor al costo de producción del sistema que utilizó humus de lombriz y NPK (T2). Esta diferencia en el costo de producción unitario, representa un ahorro en el establecimiento de nuevas plantaciones de café de  $\text{¢}150,000$  colones por hectárea (5,200 plántulas) por esa misma unidad de medida, con respecto al sistema intensivo, y aunque los productores podrían ahorrar más en el costo de establecimiento de las nuevas plantaciones utilizando los otros abonos orgánicos evaluados, una vez ajustadas las dosis, este sistema tiene el potencial de optimizar la productividad, haciendo un mayor aporte de materia orgánica y biodiversidad en el cultivo, lo cual potencialmente podría generar otros beneficios ambientales que ayudarían a acelerar y mantener la fertilidad natural del agroecosistema al mediano y largo plazo. Considerando la eficiencia económica del tratamiento T7, los caficultores de la Zona de Monteverde con necesidades de establecimiento de nuevas plantaciones que decidan utilizar este sistema de producción de almacigo, podrían derivar ahorros de alrededor de  $\text{¢}450,000$  con respecto al sistema más intensivo que están utilizando actualmente en el primer año para un área de 3 hectáreas. Ese monto representa aproximadamente un 40% del ingreso promedio para una plantación de café orgánico de 3 hectáreas, asumiendo una productividad de  $\sim 7$  fanegas por hectárea para sistemas orgánicos según datos de Porras Vanegas (2006).

Los resultados económicos revelados están contextualizados a las condiciones de la región de Monteverde, donde el factor distancia, topografía y disponibilidad de insumos moldean fuertemente el rendimiento y la sostenibilidad económica de los sistemas de producción de café. El proceso de producción del almacigo de café fue desarrollado tratando de simular cuidadosamente la forma en como los productores realizan este trabajo para producir plántulas de la mejor calidad. Sin embargo, como es de esperar en cualquier sistema productivo, los niveles de eficiencia son sensibles a la variabilidad de las condiciones de producción. Es probable que los productores, una vez que adopten e internalicen el sistema de producción de almacigo propuesto, puedan llevar la eficiencia económica a un nivel más avanzado por la vía de la dilución de costos por unidad producida con un mayor volumen de producción.

Más allá de la valoración netamente económica de los costos y beneficios de utilizar cualquiera de las alternativas de fertilización para la producción de almacigo de café para extender la caficultura en la región de Monteverde, es importante considerar que dicha valoración no incluye los costos ni los beneficios ambientales que se derivan de cada sistema de producción. En esa línea de ideas, los costos ambientales que implica el empleo sostenido de fertilizantes sintéticos a nivel del agroecosistema, los cuales tienden a ser más evidentes a mediano y largo plazo, incluyen pero no están limitados a la reducción del contenido de humus y de la biodiversidad del suelo, la acidificación del sustrato y el aumento de las emisiones de Óxido Nitroso (FAO, 2006).

El aumento de la acidez del suelo disminuye la capacidad de absorción de fosfatos por parte de los cultivos, incrementa la concentración de iones en el suelo y puede inhibir el crecimiento de las plantas (Kotschi, 2015). El agotamiento del humus disminuye la capacidad del suelo de retener nutrientes para su posterior liberación (Kotschi, 2015). La pérdida de la biodiversidad puede reducir la capacidad del sustrato de transformar la materia orgánica presente en sustancias solubles para las plantas y crear un desbalance a nivel de la dinámica de los microorganismos que regulan el control biológico (Bot *et al.*, 2005a; Altieri *et al.*, 2015). El aumento de las emisiones de gases con efecto invernadero empeora el rendimiento ambiental del cultivo y es contraproducente a los esfuerzos que se realizan a nivel nacional y mundial para combatir los efectos del calentamiento global y el cambio climático (FAO, 2013a; IPCC, 2014, 2018).

El empleo constante e irracional de insumos sintéticos, aunque tiende a aumentar la productividad del suelo al corto plazo, al largo plazo esteriliza el sustrato, generando dependencia del productor al uso de insumos externos, disminuyendo la capacidad de adaptación y resiliencia de los sistemas productivos al cambio climático, y reduciendo la velocidad y el potencial de transición de las fincas hacia el modelo de sostenibilidad que se requiere desarrollar tanto a nivel local como global (FAO, 2013b).

El principal beneficio que se deriva del empleo sostenido de soluciones orgánicas de fertilización como el compost es el mejoramiento del potencial de reconstruir y mantener la fertilidad natural del suelo a largo plazo a través de la incorporación estratégica de materia orgánica en el sustrato (FAO, 2013b; Kotschi, 2015). La presencia de material

orgánico previamente descompuesto por medios aeróbicos mejora la estructura del suelo, optimiza el proceso de formación de humus y fomenta la producción de sustancias nutritivas promotoras del crecimiento de las plantas tales como el ácido húmico y fúlvico así como los macro y micronutrientes presentes en estados solubles (Magdoff *et al.*, 2000; Altieri, 2002). La presencia de un mayor contenido de materia orgánica en el sustrato incrementa la disponibilidad de hábitat favorable para la propagación de microorganismos beneficiosos en el control biológico y la transformación de la materia orgánica (Campbell, 1989).

El empleo de soluciones de fertilización orgánica es un mecanismo efectivo para el manejo y aprovechamiento de los residuos orgánicos y el recurso hídrico (FAO, 2013b) que también aporta positivamente en aumentar la capacidad de almacenamiento de carbono en el suelo y promueve una mayor biodiversidad (Bot *et al.*, 2005a), por lo que la utilización del compost como mecanismo alternativo de fertilización es considerado como una estrategia efectiva para recuperar y aumentar la resiliencia ecológica de los agroecosistemas (FAO, 2013a; Kotschi, 2015).

Tomando en cuenta los costos y beneficios ambientales que aportan los diferentes sistemas de producción de almacigo de café, la relación costo beneficio tiende a mejorar con el empleo de las soluciones orgánicas debido a que los beneficios son mayores en cuanto a cantidad y significancia. El empleo de compost producido con residuos biomásicos, MM y LDBIO es una solución que representa un paso hacia una mayor sostenibilidad para la producción orgánica de café en la región de Monteverde que puede ser extendida a otras regiones con condiciones similares. Se requiere seguir investigando e innovando mecanismos para aumentar y revelar más efectivamente la eficiencia económica y ambiental de las soluciones de fertilización.

Para efectos de demostrar la verdadera relación de costos y beneficios de las diferentes técnicas de manejo en los agroecosistemas, y así hacer más transparente la elegibilidad por parte de los productores, es necesario diseñar un modelo de valoración que permita medir el desempeño y la sostenibilidad económica, social y ambiental de dichas técnicas en forma integral, lo cual podría lograrse con el empleo de metodologías de valoración pluridimensionales como las que ofrece el análisis multicriterio (AMC) (Ortega Navarro,

2014; Hernández-Chaverri *et al.*, 2017). El AMC valora en forma clara, transparente y rigurosa las características actuales de un problema o proceso para la toma de decisiones (Linkov & Moberg, 2011). Provee un enfoque holístico en el análisis del fenómeno de interés a través de la identificación de sus partes, el reconocimiento del peso de cada una de esas partes y la valoración de los vínculos entre ellas. Basado en el entendimiento más completo de la complejidad del objeto de estudio, el modelo guía a los actores involucrados a encontrar soluciones prácticas y objetivas a los problemas detectados y a tomar decisiones ponderadas de acuerdo a las características reveladas (Triantaphyllou, 2013).

El AMC permite el estudio de relaciones complejas a diferentes niveles de resolución y podría emplearse para explicar más profundamente el papel de la biodiversidad en el suelo así como el efecto del manejo agronómico sobre sus funciones en el agroecosistema. La biodiversidad tiene un papel preponderante en la dinámica del agroecosistema ya que es el elemento que asegura el mantenimiento de funciones vitales como la descomposición de la materia orgánica y el control biológico (Altieri, 2002; Bot *et al.*, 2005a). El aumento y el mantenimiento de la biodiversidad en el sistema, a como sucede con la incorporación de compost en el sustrato, es un mecanismo efectivo para aumentar la resiliencia e integridad ecológica del sistema ante los efectos del cambio climático y el deterioro ambiental, ya que la redundancia de especies aumenta la probabilidad de que las funciones se sigan dando aún cuando ocurran extinciones de organismos funcionales. De esta forma, un suelo con mayor biodiversidad, tendrá mejores posibilidades de recuperar y mantener su funcionamiento y fertilidad al corto plazo.

Muchos productores, a pesar de estar conscientes de la importancia de la conservación de la biodiversidad, por falta de conocimiento, utilizan prácticas de manejo que son contraproducentes a su mantenimiento y optimización, como es el uso sostenido de agroquímicos tóxicos, que si bien es cierto incrementan el rendimiento del sistema productivo al corto plazo, lo hacen a expensas del deterioro del suelo y de la sostenibilidad de la capacidad productiva futura del agroecosistema (Tilman *et al.*, 2002; Townsend *et al.*, 2003; Diaz *et al.*, 2008; Park *et al.*, 2012; FAO, 2013a).

Para efectos de lograr una mejor comprensión de las interacciones suelo-biodiversidad, así como poder demostrar a los productores, en una forma más completa y sintética, la importancia de minimizar el uso de agroquímicos y potencializar el empleo de sistemas de fertilización alternativos como el compostaje, se podría utilizar el enfoque de análisis multicriterio para diseñar una metodología de valoración integral que mida el efecto temporal y espacial sobre las funciones de la biodiversidad y la productividad del suelo que ejerce el uso de agroquímicos y el empleo del compost como mecanismo para revertir el efecto degradatorio de los materiales sintéticos en el sustrato.

El estudio podría contemplar la utilización de técnicas más avanzadas para cuantificar no solo las concentraciones totales de biomasa microbiana del suelo, sino la identidad de las especies a través de análisis de secuenciación genética de próxima generación (Behjati & Tarpey, 2013; Jenkins *et al.*, 2017) que permitan el cálculo de índices de biodiversidad según el tipo de manejo. Paralelamente se podría valorar el recambio en la cantidad y diversidad de los grupos funcionales de microorganismos del suelo (bacterias, hongos, actinomicetos, N-fijadores, entre otros) de acuerdo al manejo agronómico utilizando ácidos grasos fosfolípidos (Amir *et al.*, 2010; Lombao *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2016) como biomarcadores de los diferentes grupos.

El cambio en el aprovisionamiento de servicios ecosistémicos como el ciclaje de carbono en el suelo podría ser valorado de acuerdo a cada modelo de intervención utilizando el monitoreo de isótopos estables (p.ej.  $^{13}\text{C}$ ) (Wild *et al.*, 2014), mientras que otros cambios en la salud y la calidad del agroecosistema edáfico podrían ser valoradas a través del monitoreo de enzimas como hidrolasas, transferasas, oxidorreductasas, liasas, ureasas, deshidrogenasas y amilasas (Barbosa *et al.*, 2016), las cuales están directamente relacionadas con los ciclos del C, N, P y S del suelo y con otras funciones de la biodiversidad (Rincón & Muñoz, 2005).

El análisis de la parte funcional de cada escenario de manejo podría complementarse con un análisis del rendimiento económico en términos de los costos de producción y de oportunidad y una vez que se cuenten con los resultados de los diferentes análisis, las variables podrán ser ponderadas e indexadas de acuerdo a su peso relativo para ser incorporadas en el análisis multicriterio. Los resultados del análisis podrían proyectarse

utilizando gráficos radiales (Benedito, 2016), de tal forma que tanto productores como investigadores logren tener una visión trasparente, integral, completa y precisa de los efectos del uso de los agroquímicos en comparación con el compost en las funciones de la biodiversidad y el rendimiento del agroecosistema y utilizar esa información como herramienta para la toma de decisiones sobre cuales técnicas de manejo agronómico son más convenientes para la sostenibilidad del agroecosistema de acuerdo a sus objetivos.

#### 5.3.4 EVOLUCIÓN HACIA UN NUEVO PARADIGMA DE SOSTENIBILIDAD AGROECOSISTEMICA

Si bien es cierto que la solución de fertilización propuesta mostró ser una alternativa viable y efectiva para la producción de almacigo de café en la región de Monteverde, más allá de la validación teórica y procedimental del sistema, desde el punto filosófico, los resultados de la investigación demuestran con suficiente evidencia empírica, que con la adecuada inversión de tiempo y recursos tecnológicos es posible optimizar la evolución hacia un nuevo paradigma de sostenibilidad agroecosistémica.

Este paradigma se basa en el aprovechamiento de los intercambios y sinergias que se generan naturalmente a lo interno de cada unidad de producción, entre las diferentes unidades productivas y en el agropaisaje para recuperar el potencial económico y la capacidad de aprovisionamiento de los servicios ecosistémicos de los agroecosistemas para la sociedad (Kremen, Iles, *et al.*, 2012; Harvey *et al.*, 2014). En este nuevo paradigma, la tarea del investigador es utilizar las herramientas tecnológicas y científicas para revelar las formas en como las relaciones entre los diferentes componentes del sistema pueden ser restauradas y fortalecidas con el fin de potencializar su resiliencia y capacidad adaptativa para sostener su productividad durante eventos extremos del clima y el mercado.

El productor pasa de ser un simple receptor y ejecutor de paquetes tecnológicos a convertirse en el concatenador del sistema, quien nutre con curiosidad, dedicación y

esmero, el óptimo funcionamiento del organismo agroproductivo. Utiliza métricas adaptadas a las condiciones agroecológicas locales para evaluar y corregir adaptativamente la evolución del sistema y es también el interlocutor que comunica los resultados y experiencias exitosas de manejo hacia los demás actores en forma colaborativa y participativa. De igual manera, es el que informa al gobierno y en especial a los investigadores de universidades y centros de investigación especializados, acerca de las necesidades de información y desarrollo que se van presentando conforme se da el proceso de evolución del sistema hacia el nuevo paradigma. Estos centros responden con procesos de investigación y apoyo logístico para resolver los problemas que se detecten en forma oportuna. El consumidor es el contralor de la calidad de los productos y quien en forma mutualista brinda el contenido económico adecuado para que el productor realice sus actividades y le permita tener una calidad de vida justa y equitativa. El productor se organiza en mercados especializados donde se da un intercambio de bienes, servicios e ideas que aportan a la evolución del sistema de alimentación.

Aunque la evolución e implementación de este nuevo paradigma de sostenibilidad agroecosistema se visualice como una tarea difícil, la situación actual de deterioro ambiental, inseguridad alimentaria y cambio climático demanda soluciones creativas e innovadoras que se ajusten al nivel de complejidad de los problemas que deben ser atendidos en forma inmediata (FAO *et al.*, 2018; IPCC, 2018). El presente proyecto es un paso seguro que acerca los agroecosistemas cafetaleros de pequeña escala a ese nuevo paradigma de sostenibilidad, y aunque el avance logrado no alcanza resolver por completo y de forma inmediata todos los problemas a los que se enfrentan los cafetaleros de la región de Monteverde, sí brinda un fuerte mensaje al sector agropecuario regional, nacional y global, que con la adecuada planificación e inversión en investigación y desarrollo, es posible obtener soluciones que permitan intensificar sosteniblemente la producción y avanzar hacia el logro de los objetivos mundiales de sostenibilidad y erradicación de la pobreza, la insalubridad y la inseguridad alimentaria (Kremen, Iles, *et al.*, 2012; FAO *et al.*, 2018).

## **CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **6.1.1 CONCLUSIONES**

El compost elaborado con residuos biomásicos locales, microorganismos de montaña y lodos digeridos de biodigestor es un sistema de fertilización confiable para la producción de almácigo de café orgánico en la región de Monteverde, Puntarenas, Costa Rica y es una solución viable al problema de la escasez de alternativas de fertilización efectivas y validadas científicamente para la producción de almacigo de alta calidad.

El nuevo sistema de fertilización produjo plántulas con un excelente nivel de desarrollo y calidad fitosanitaria, y presentó costos de producción menores a los del sistema de fertilización convencional intensivo que utilizan los cafetaleros de la región, debido a que se fundamenta en el empleo de residuos disponibles localmente, lo cual promueve un mejor manejo de los desechos en las fincas y facilita la recuperación de nutrientes escasos como el fósforo.

El nuevo sistema se alinea armoniosamente con los objetivos de sostenibilidad de los productores locales, permitiéndoles tener acceso a opciones de certificación de sus cafetales desde la etapa del vivero. El sistema es congruente con los principios de la agricultura climáticamente inteligente ya que aprovecha las sinergias y beneficios que ofrece la integración de la tecnología del compostaje, el cultivo de microorganismos nativos del bosque y el aprovechamiento de los biosólidos derivados de la descontaminación anaeróbica de aguas residuales, para producir un compost de mayor calidad que ayuda a recuperar y mantener las características de fertilidad y biodiversidad del suelo, lo cual extiende el alcance del paradigma de producción sostenible en la región de Monteverde y mejora las oportunidades para intensificar sosteniblemente la productividad económica y la capacidad adaptativa de los sistemas de producción cafetaleros a los efectos de la variabilidad climática y el deterioro ambiental.

La viabilidad técnica del nuevo biofertilizante está dada desde el punto de vista de la validez del diseño y el método de preparación del compost, la calidad del producto

terminado y el rendimiento que ofrece sobre el crecimiento del almacigo. Desde el punto de vista de validez del diseño y la técnica de producción, el sistema de fertilización propuesto cumplió satisfactoriamente con todos los parámetros teóricos del proceso de compostaje, incluyendo las tres etapas térmicas que aseguran la estabilidad y madurez del material terminado (mesófila uno y dos, y termófila). El tiempo de estabilización y maduración de la biomasa se mantuvo dentro del rango óptimo en menos de 150 días, y la incorporación de los microorganismos y los lodos no afectó el pH, la conductividad eléctrica, la saturación de oxígeno ni el contenido de agua durante el proceso de transformación de la materia orgánica, lo cual indica que el diseño y el método preparación fue adecuado.

Desde el punto de vista de calidad, el sistema de fertilización propuesto logró alcanzar niveles adecuados de estabilidad, madurez, inocuidad, pH y conductividad eléctrica, lo cual indica que el material terminado es de óptima calidad. Estos parámetros no fueron afectados por la incorporación de microorganismos y lodos en el material compostable. Por el contrario, la integración de ambos compuestos en la mezcla produjo una mejora en la concentración de macronutrientes, así como en el contenido de materia orgánica, carbono, humedad y biomasa microbiana con respecto al compost convencional. Se determinó que el empleo combinado de ambos insumos puede provocar fitotoxicidad en cultivos herbáceos, como las cucurbitáceas, por lo que es necesario desarrollar investigaciones más específicas dirigidas a explicar la razones y el alcance de la fitotoxicidad observada.

La incorporación de compost en el suelo como fertilizante optimizó los principales parámetros de fertilidad del sustrato de crecimiento incluyendo el pH, la suma de bases intercambiables, la capacidad de intercambio catiónico efectiva, el contenido de fósforo y la concentración de biomasa microbiana. También aumentó el contenido de Zn y Fe y elevó levemente la salinidad del suelo, lo cual puede tener un efecto negativo sobre el adecuado crecimiento del cultivo que necesita ser investigado a posteriori.

Desde el punto de vista de rendimiento sobre el crecimiento del almacigo, el sistema de fertilización propuesto produjo plántulas que alcanzaron un desarrollo de más de un 200% del peso seco en comparación con las que no recibieron ningún tipo de fertilización,

lo cual indica que el compost experimental tiene un efecto positivo sobre el crecimiento de este cultivo. El nivel de desarrollo y el estado fitosanitario alcanzado fue equivalente al de las plántulas expuestas al sistema de fertilización convencional intensivo que utilizan los productores locales, el cual emplea una mezcla de suelo, vermicompost y abono sintético NPK (10:30:10) en el sustrato de crecimiento. El costo de producción por plántula y la relación costo beneficio bajo el sistema propuesto fueron un 10% menor al del sistema convencional intensivo. La diferencia en el costo de producción unitario representa un ahorro en el establecimiento de nuevas plantaciones de café de ¢150,800 colones por hectárea, y de ¢450,000 en fincas de 3 ha representativas de la región de Monteverde, ahorro que equivale a un 40% de los ingresos del primer año de cosecha para una finca orgánica de ese tamaño.

Aunque los resultados específicos del presente estudio están contextualizados a las condiciones agroecológicas de la región de Monteverde, se considera que siempre y cuando se respeten las técnicas de producción empleadas, es probable que se puedan obtener resultados congruentes en otras regiones cafetaleras con condiciones similares.

### 6.1.2 RECOMENDACIONES

Se recomienda continuar utilizando un esquema de producción sostenible de establecimiento y manejo de los cafetos a nivel de plantación para efectos de aprovechar el óptimo desarrollo y estado fitosanitario alcanzado en la etapa de vivero a partir del empleo de compost. La implementación del enfoque de producción sostenible, aunque puede generar una menor productividad al corto plazo, tiene el potencial de robustecer la resiliencia económica y ambiental de los sistemas productivos a mediano y largo plazo, incrementar las oportunidades de adaptación a las fluctuaciones ambientales y ampliar las oportunidades de diferenciación del producto final en el mercado.

En vista de los buenos resultados obtenidos con el empleo del compost experimental en la producción de almácigo de café, se recomienda realizar pruebas con este nuevo

sistema de fertilización en otros agroecosistemas y cultivos, para efectos de determinar el alcance del esquema de producción propuesto hacia otros modelos de producción.

Con el fin de ampliar el rendimiento del sistema de fertilización orgánico propuesto por encima del sistema de fertilización convencional intensivo, es necesario investigar los mecanismos para propiciar una mayor absorción de los nutrientes disponibles en el compost. Algunos de los mecanismos que pueden ser investigados incluyen pero no están limitados a realizar un aumento de las dosis de aplicación de microorganismos nativos del suelo y biosólidos en el sustrato, efectuar un lavado de las sales o incorporar otros agentes optimizadores de fertilidad natural como roca fosfórica y/o comunidades de microorganismos más específicas como micorrizas arbusculares o *Trichoderma*.

Es necesario investigar otras formas integrales de valoración de la sostenibilidad de los sistemas de fertilización orgánica y otros modelos de producción sostenible, donde se debe considerar el empleo de métodos basados en la medición de la evolución de las funciones del agroecosistema, como la contabilización de los cambios en la biodiversidad y el aprovisionamiento de servicios ecosistémicos (p.ej. fijación de nutrientes y bioremediación), para lo cual se pueden emplear técnicas de valoración avanzadas como la secuenciación genética de próxima generación, la cuantificación de las concentraciones de ácidos grasos fosfolípidos de los diferentes grupos taxonómicos de microorganismos, el monitoreo de la actividad enzimática metabólica y la translocación de isótopos estables para modelar el movimiento de recursos en el agroecosistema. La valoración conjunta de las métricas puede realizarse a través de procesos con un enfoque de cuantificación multidimensional como el que ofrece el análisis multicriterio.

Se insta y motiva a otros investigadores, productores, y agencias gubernamentales a realizar una mayor inversión de tiempo y recursos para continuar desarrollando soluciones innovadoras dirigidas a extender integralmente los límites del conocimiento sobre los sistemas de producción y consumo sostenible.

## CAPITULO VII: BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

- Acosta Almánzar, H. A. (2012). *Microorganismos eficientes de montaña : evaluación de su potencial bajo manejo agroecológico de tomate en Costa Rica*. Turrialba (Costa Rica): CATIE.
- Adegbidi, H. G., Briggs, R. D., Volk, T. A., White, E. H., & Abrahamson, L. P. (2003). Effect of organic amendments and slow-release nitrogen fertilizer on willow biomass production and soil chemical characteristics. *biomass and bioenergy*, 25(4), 389-398.
- Alcalá, M., Hidalgo Moreno, C., Castoreña, G., & del Carmen, M. (2009). Mineralogía y retención de fosfatos en andisoles. *Terra Latinoamericana*, 27(4), 275-286.
- Altieri, M. A. (2002). Agroecology: the science of natural resource management for poor farmers in marginal environments. *Agriculture, ecosystems & environment*, 93(1), 1-24.
- Altieri, M. A. (2009). El estado del arte de la agroecología: revisando avances y desafíos. *Vertientes del pensamiento agroecológico: fundamentos y aplicaciones* (pp. 69). Medellín, Colombia: Sociedad Científica Latinoamericana de Agroecología.
- Altieri, M. A., & Nicholls, C. I. (2004). *Biodiversity and pest management in agroecosystems*: CRC Press.
- Altieri, M. A., Nicholls, C. I., Henao, A., & Lana, M. A. (2015). Agroecology and the design of climate change-resilient farming systems. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(3), 869-890. doi:10.1007/s13593-015-0285-2
- Alvarado, A., Mata, R., & Chinchilla, M. (2014). Arcillas identificadas en suelos de Costa Rica a nivel generalizado durante el período 1931-2014: I. Historia, metodología de análisis y mineralogía de arcillas en suelos derivados de cenizas volcánicas. *Agronomía costarricense: Revista de ciencias agrícolas*, 38(1), 76-106.
- Alvarado, A. S., & Rojas, R. C. (1994). *Cultivo y beneficiado del café*: EUNED.
- Amir, S., Abouelwafa, R., Meddich, A., Souabi, S., Winterton, P., Merlina, G., . . . Hafidi, M. (2010). PLFAs of the microbial communities in composting mixtures of agro-

- industry sludge with different proportions of household waste. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 64(7), 614-621.
- Amira, R. D., Roshanida, A., Rosli, M., Zahrah, M. S. F., Anuar, J. M., & Adha, C. N. (2011). Bioconversion of empty fruit bunches (EFB) and palm oil mill effluent (POME) into compost using *Trichoderma virens*. *African Journal of Biotechnology*, 10(81), 18775-18780.
- Andrades, M., & Martínez, M. E. (2014). *Fertilidad del suelo y parámetros que la definen*. España: Servicio de Publicaciones Universidad de Rioja.
- Antil, R. S., & Raj, D. (2012). Chemical and microbiological parameters for the characterization of maturity of composts made from farm and agro-industrial wastes. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 58(8), 833-845.
- Armstrong, R. A. (2014). When to use the Bonferroni correction. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 34(5), 502-508.
- Avila, R., Elías, W., Sadeghian Khalajabadi, S., Arciniégas, S., María, P., Franco, C., & Eduardo, H. (2007). Producción de almácigos de café en el departamento de Santander con diferentes fuentes de materia orgánica y de fósforo. *Avances técnicos Cenicafé*, 356(1), 1-12.
- Barbosa, M. d. A., Luiz Mendes Coutinho, E., Rodrigues Soares, E., Ochoa Martinez, E., Toledo, R., & Rigobelo, E. (2016). *Actividad enzimática del suelo en sistemas de manejo de larga duración*. Paper presented at the XXV Congreso Argentino de ciencias del suelo Río Cuarto, Córdoba, Argentina.
- Barton, L. (2012). *Iron Chelation in Plants and Soil Microorganisms*: Elsevier Science.
- Beddington, J., Asaduzzaman, M., Fernandez, A., Clark, M., Guillou, M., Jahn, M., . . . Nobre, C. A. (2012). *Achieving food security in the face of climate change: Final report from the Commission on Sustainable Agriculture and Climate Change*. Copenhagen, Denmark: CGIAR Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security (CCAFS).
- Behjati, S., & Tarpey, P. S. (2013). What is next generation sequencing? *Archives of Disease in Childhood-Education and Practice*, 98(6), 236-238.
- Beltrán, E., Miralles de Imperial, R., Porcel, M., Delgado, M., Beringola, M., Martín, J., & Bigeriego, M. (2002). *Effect of sewage sludge compost application on*

- ammonium-nitrogen and nitrate-nitrogen contents of an olive grove soil*. Paper presented at the 12th ISCO Conference, Beijing.
- Benedito, M. Á. P. (2016). La aplicación de los gráficos radiales en el análisis contable del sector pesquero en Cataluña: Gráfico radial y análisis contable. *Revista Internacional de Economía y Gestión de las organizaciones*, 1(2).
- Bernal, M. P., Sommer, S. G., Chadwick, D., Qing, C., Guoxue, L., & Michel Jr, F. C. (2017a). Current Approaches and Future Trends in Compost Quality Criteria for Agronomic, Environmental, and Human Health Benefits. *Advances in agronomy*, 144.
- Bernal, M. P., Sommer, S. G., Chadwick, D., Qing, C., Guoxue, L., & Michel Jr, F. C. (2017b). Current approaches and future trends in compost quality criteria for agronomic, environmental, and human health benefits *Advances in agronomy* (Vol. 144, pp. 143-233): Elsevier.
- Blaya, S. N., & García, G. N. (2003). *Química agrícola: el suelo y los elementos químicos esenciales para la vida vegetal*: Mundi-Prensa.
- Borin, K., & Frankow-Lindberg, B. E. (2006). The effects of effluent from biodigesters loaded with pig or cow manures on soil fertility and forage yield of cassava grown as a perennial crop. *Biological Agriculture & Horticulture*, 24(1), 91-104.
- Bot, A., & Benites, J. (2005a). *The importance of soil organic matter: key to drought-resistant soil and sustained food production*. ROME: FAO.
- Bot, A., & Benites, J. (2005b). *The Importance of Soil Organic Matter: Key to Drought-resistant Soil and Sustained Food Production*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Botero, B., & Preston, T. R. (1987). Biodigestor de bajo costo para la producción de combustible y fertilizante a partir de excretas. *Manual para su instalación, operación y utilización*. Centro Internacional de Agricultura Tropical. Cali, Colombia, 353-362.
- Brown, M. E., & Chang, M. C. (2014). Exploring bacterial lignin degradation. *Current opinion in chemical biology*, 19, 1-7.
- BSI. (2011). *PAS 100:2011. Specification for Composted Materials*. London, UK.: British Standards Institution.

- Bustamante, F., Isaza, C. H., van Heeren, N., Torres, G., & Romero, R. (2009). *Buenas prácticas para la producción de café*. The Netherlands: Editorial Fundación Solidaridad.
- Camacho-Céspedes, F., Uribe-Lorío, L., Newcomer, Q., Masters, K. L., & Kinyua, M. (2018). Bio-optimización del compost con cultivos de microorganismos de montaña (MM) y lodos digeridos de biodigestor (LDBIO). *Cuadernos de Investigación, Universidad Estatal a Distancia Costa Rica*, 10(2), 330-341.
- Campbell, R. (1989). *Biological control of microbial plant pathogens*: Cambridge University Press.
- Campitelli, P., & Ceppi, S. (2008). Chemical, physical and biological compost and vermicompost characterization: A chemometric study. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 90(1), 64-71.
- Campo-Martínez, A., Acosta-Sanchez, R. L., Morales-Velasco, S., & Prado, F. A. (2014). Evaluación de microorganismos de montaña (mm) en la producción de acelga en la meseta de Popayán. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 12(1), 79-87.
- Casierra-Posada, F., Sánchez, P., Castaño, J., & Viasús, R. (2011). Identificación de la cantidad y frecuencia óptimas de riego para almácigos de café (*Coffea arabica* v. "castillo") en la subestación experimental de Cenicafé Santander. *CIENCIA Y AGRICULTURA*, 7(2), 41-52.
- Castro Barquero, L., Murillo Roos, M., Uribe Lorío, L., & Mata Chinchilla, R. (2015). Inoculación al suelo con *Pseudomonas fluorescens*, *Azospirillum oryzae*, *Bacillus subtilis* y microorganismos de montaña (mm) y su efecto sobre un sistema de rotación soya-tomate bajo condiciones de invernadero. *Agronomía Costarricense*, 39(3).
- CEPAL. (2010). *Costa Rica: efectos del cambio climático sobre la agricultura*. Mexico: CEPAL.
- Chamberlain, T., Daly, M. J., & Merfield, C. (1997). *Utilisation of effective microorganisms commercial organic agriculture: a case study from New Zealand*. Paper presented at the 5th International Nature Farming Conference.

- Chará, J., Pedraza, G., & Conde, N. (1999). The productive water decontamination system: A tool for protecting water resources in the tropics. *Livestock Research for Rural Development*, 11(1).
- Chatzistathis, T. (2014). *Micronutrient Deficiency in Soils and Plants*: Bentham Science Publishers.
- Chaves Arias, V. (2012). Manejo de la nutrición y fertilización de almácigo de café en bolsa. *Revista Informativa Icafe Costa Rica*, 1(1), 14-16.
- Chesworth, W. (2007). *Encyclopedia of Soil Science*: Springer Netherlands.
- Chinchilla Ramos, R. (2015). *Determinación del uso de la tierra y la fragmentación boscosa en el Corredor Biológico Pájaro Campana: promoviendo estrategias de conservación y manejo integral*. (Tesis de Licenciatura en Geografía), Universidad de Costa Rica.
- Clark, K., Lawton, R., & Butler, P. (2000). The physical environment. In N. N. N. Wheelwright (Ed.), *Monteverde Ecology and Conservation of a Tropical Cloud Forest* (Vol. 1). New York and Oxford: Oxford University Press.
- Clark, M., & Tilman, D. (2017). Comparative analysis of environmental impacts of agricultural production systems, agricultural input efficiency, and food choice. *Environmental Research Letters*, 12(6), 064016.
- Clesceri, L. S., Greenberg, A. E., & Eaton, A. D. (1998). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20th Edition*: APHA American Public Health Association.
- Composting council. (1996). *Field guide to compost use*. North Carolina, USA: Composting council.
- Concejo Local CBPC. (2011). Plan Estratégico 2011-2016- Corredor Biológico Pájaro Camapana. Concejo Local CBPC, Monteverde. Costa Rica
- Cribb, J. (2010). *The coming famine: the global food crisis and what we can do to avoid it*: Univ of California Press.
- da Silva, W. T. L., de Novaes, A. P., Kuroki, V., Martelli, L. F. D., & Magnoni, L. (2012). Physical-chemical evaluation of an effluent treated in anaerobic biodigester regarding its efficiency and application as fertilizer. *Quimica Nova*, 35(1), 35-40.

- De Corato, U., Salimbeni, R., De Pretis, A., Patruno, L., Avella, N., Lacolla, G., & Cucci, G. (2018). *Microbiota from 'next-generation green compost' improves suppressiveness of composted Municipal-Solid-Waste to soil-borne plant pathogens* (Vol. 124).
- De Melo, E. (2017). Cafetales sanos, productivos y ambientalmente amigables Guía para trabajo confamilias productoras.
- Delgado, J. A., Groffman, P. M., Nearing, M. A., Goddard, T., Reicosky, D., Lal, R., . . . Salon, P. (2011). Conservation practices to mitigate and adapt to climate change. *Journal of Soil and Water Conservation*, 66(4), 118A-129A.
- Dias, K. G. d. L., Neto, A. E. F., Guimarães, P. T. G., Reis, T. H. P., & Oliveira, C. H. C. d. (2015). Coffee yield and phosphate nutrition provided to plants by various phosphorus sources and levels. *Ciência e Agrotecnologia*, 39(2), 110-120.
- Días Romeu, R., & Hunter, A. (1978). *Metodología de Muestreo de Suelos, análisis químico de suelos y tejido vegetal e investigación en invernadero*. Turrialba, Costa Rica: CATIE.
- Díaz Barragán, O. A., Montero Robayo, D. M., & Lagos Caballero, J. A. (2009). Acción de microorganismos eficientes sobre la actividad de intercambio catiónico en plántulas de *Acacia melanoxylon* para la recuperación de un suelo del municipio de mondoñedo, Cundinamarca. *Colombia Forestal*, 12(1), 141-160.
- Diaz, R. J., & Rosenberg, R. (2008). Spreading dead zones and consequences for marine ecosystems. *Science*, 321(5891), 926-929.
- Ercoli, L., Mariotti, M., Masoni, A., & Bonari, E. (1999). Effect of irrigation and nitrogen fertilization on biomass yield and efficiency of energy use in crop production of *Miscanthus*. *Field Crops Research*, 63(1), 3-11.
- Erhart, E., & Hartl, W. (2010). Compost use in organic farming *Genetic Engineering, Biofertilisation, Soil Quality and Organic Farming* (pp. 311-345): Springer.
- Ewel, J. J. (1999). Natural systems as models for the design of sustainable systems of land use. *Agroforestry systems*, 45(1-3), 1-21.
- FAO. (1999). *A Statistical Manual For Forestry Research*. Bangkok: FAO.
- FAO. (2006). *Livestock's long shadow*. Rome: FAO.
- FAO. (2013a). *Climate Smart Agriculture Sourcebook*. Rome: FAO.

- FAO. (2013b). *Manual de Compostaje del Agricultor*. Santiago de Chile: FAO.
- FAO. (2014). *Building a common vision for sustainable food and agriculture: Principles and approaches*. Rome: FAO.
- FAO. (2016). *Cooperación Sur-Sur: Potenciar la intensificación sostenible de la agricultura*. Retrieved from Rome:
- FAO, IFAD, UNICEF, WFP, & WHO. (2018). *The State of Food Security and Nutrition in the World 2018. Building climate resilience for food security and nutrition*. . Retrieved from Rome:
- Fernández, G. (2018). *Propuesta de un diseño agroforestal con café (Coffea arabica) y manejo orgánico en la región de Monteverde, Costa Rica*. (Licenciatura), Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.
- Ferrer, I., Garfi, M., Uggetti, E., Ferrer-Martí, L., Calderon, A., & Velo, E. (2011). Biogas production in low-cost household digesters at the Peruvian Andes. *biomass and bioenergy*, 35(5), 1668-1674.
- Florez, J. A., Muschler, R., Harvey, C., Finegan, B., & Roubik, D. W. (2002). Biodiversidad funcional en cafetales: El rol de la diversidad vegetal en la conservación de abejas. *Agroforestería en las Américas*, 9, 35-36.
- Foley, J. A., DeFries, R., Asner, G. P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S. R., . . . Gibbs, H. K. (2005). Global consequences of land use. *Science*, 309(5734), 570-574.
- Foley, J. A., Ramankutty, N., Brauman, K. A., Cassidy, E. S., Gerber, J. S., Johnston, M., . . . West, P. C. (2011). Solutions for a cultivated planet. *Nature*, 478(7369), 337-342.
- Foresight, U. (2011). The future of food and farming: Challenges and choices for global sustainability. *Government Office for Science, Foresight, Final Project Report*.
- Formowitz, B., Elango, F., Okumoto, S., Müller, T., & Buerkert, A. (2007). The role of “effective microorganisms” in the composting of banana (*Musa ssp.*) residues. *Journal of plant nutrition and soil science*, 170(5), 649-656.
- Garcia, G. N., & Garcia, S. N. (2013). *Química Agrícola Química del Suelo Y de Nutrientes Esenciales para las Plantas*. Madrid, España: Mundi-Prensa Libros.

- Garfield, F. M., Klesta, E., & Hirsh, J. (2000). *Quality Assurance Principles for Analytical Laboratories* (Vol. Third Edition). Gaithersburg, MD, USA: AOAC International.
- Garg, N., & Chandel, S. (2010). Arbuscular mycorrhizal networks: process and functions. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 30(3), 581-599.
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., & Hultink, E. J. (2017). The Circular Economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143(Supplement C), 757-768.
- Gissel-Nielsen, G., & Jensen, A. (2013). *Plant Nutrition — Molecular Biology and Genetics: Proceedings of the Sixth International Symposium on Genetics and Molecular Biology of Plant Nutrition*: Springer Netherlands.
- Gliessman, S. R. (1998). *Agroecology: Ecological Process in Sustainable Agriculture*. Ann Arbor, MI: Ann Arbor Press.
- Gliessman, S. R. (2007). *Agroecology: The Ecology of Sustainable Food Systems*: CRC Press.
- Goh, T. B., Huang, P., & Rennie, D. (1986). Phytotoxicity of organic acids as influenced by montmorillonite, hydroxy-Al montmorillonite and phosphate fertilization. *Communications in soil science and plant analysis*, 17(5), 515-531.
- Golabi, M. H., Denney, M., & Iyekar, C. (2007). Value of composted organic wastes as an alternative to synthetic fertilizers for soil quality improvement and increased yield. *Compost science & utilization*, 15(4), 267-271.
- Goodwin, S., McPherson, J. D., & McCombie, W. R. (2016). Coming of age: ten years of next-generation sequencing technologies. *Nature Reviews Genetics*, 17(6), 333.
- Guzman, C. A., & Riaño, N. M. (1996). Respuesta de plantas de café en etapa de almácigo a la Fertilización foliar. *Avances técnicos Cenicafé*(232), 1-4.
- Hachicha, R., Rekik, O., Hachicha, S., Ferchichi, M., Woodward, S., Moncef, N., . . . Mechichi, T. (2012). Co-composting of spent coffee ground with olive mill wastewater sludge and poultry manure and effect of *Trametes versicolor* inoculation on the compost maturity. *Chemosphere*, 88(6), 677-682.
- Harvey, C. A., Chacon, M., Donatti, C. I., Garen, E., Hannah, L., Andrade, A., . . . Chara, J. (2014). Climate-Smart Landscapes: Opportunities and Challenges for

- Integrating Adaptation and Mitigation in Tropical Agriculture. *Conservation Letters*, 7(2), 77-90.
- Haug, R. T. (1993). *The Practical Handbook of Compost Engineering*: Taylor & Francis.
- Hernández-Chaverri, R., Camacho-Céspedes, F., & Hernández-Barrero, J. (2017). Análisis multicriterio del modelo de gestión de la Reserva Biológica Bosque Nuboso Monteverde, Puntarenas, Costa Rica. *Repertorio Científico*, 20(1), 13-34.
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2010). *Metodología de la investigación*. México: Editorial Mc Graw Hill.
- Hess, T. F., Grdzlishvili, I., Sheng, H., & Hovde, C. J. (2004). Heat inactivation of *E. coli* during manure composting. *Compost science & utilization*, 12(4), 314-322.
- Higa, T., & Wididana, G. (1991). *The concept and theories of effective microorganisms*. Paper presented at the Proceedings of the first international conference on Kyusei nature farming. US Department of Agriculture, Washington, DC, USA.
- Hobbs, P. R. (2007). Conservation agriculture: what is it and why is it important for future sustainable food production? *Journal of Agricultural science Cambridge*, 145(2), 127.
- Horrigan, L., Lawrence, R. S., & Walker, P. (2002). How sustainable agriculture can address the environmental and human health harms of industrial agriculture. *Environmental health perspectives*, 110(5), 445.
- Hossain, M. A., Kamiya, T., Burritt, D. J., Tran, L. S. P., & Fujiwara, T. (2017). *Plant Macronutrient Use Efficiency: Molecular and Genomic Perspectives in Crop Plants*: Elsevier Science.
- Hsu, J.-H., & Lo, S.-L. (2001). Effect of composting on characterization and leaching of copper, manganese, and zinc from swine manure. *Environmental Pollution*, 114(1), 119-127.
- Huber, D. M., & Haneklaus, S. (2007). Managing nutrition to control plant disease. *Landbauforschung Volkenrode*, 57(4), 313.
- Hussain, T., Javaid, T., Parr, J., Jilani, G., & Haq, M. (1999). Rice and wheat production in Pakistan with effective microorganisms. *American Journal of Alternative Agriculture*, 14(01), 30-36.

- ICAFFE. (2013). *Guía técnica para el cultivo del café en Costa Rica*. Heredia, Costa Rica: ICAFFE.
- ICAFFE. (2017). *Modelo de Costos de Renovación de Cafetales Cosecha 2016-2017*. Retrieved from Costa Rica:
- Illera-Vives, M., López-Mosquera, M., López-Fabal, A., & Salas San Juan, C. (2014). Reducción de la salinidad de un compost In M. T. B. Silva (Ed.), *Avances en la investigación de compost*. España: Andabarra Editora.
- INTA. (2015). *Suelos de Costa Rica Orden Andisoles*. San José, Costa Rica: INTA Instituto Nacional de Innovación y Transferencia de Tecnología Agropecuaria.
- IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the IPCC*. . IPCC, Geneva, Switzerland: IPCC.
- IPCC. (2018). *Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*. Retrieved from Geneva, Switzerland:
- Jenkins, J. R., Viger, M., Arnold, E. C., Harris, Z. M., Ventura, M., Miglietta, F., . . . Fornasier, F. (2017). Biochar alters the soil microbiome and soil function: results of next-generation amplicon sequencing across Europe. *Gcb Bioenergy*, 9(3), 591-612.
- Jenkinson, D., & Powlson, D. S. (1976). The effects of biocidal treatments on metabolism in soil—V: a method for measuring soil biomass. *Soil biology and Biochemistry*, 8(3), 209-213.
- Joo, S. H., Monaco, F. D., Antmann, E., & Chorath, P. (2015). Sustainable approaches for minimizing biosolids production and maximizing reuse options in sludge management: A review. *Journal of environmental management*, 158, 133-145.
- Juárez, M., Cerdán, M., & Sánchez-Sánchez, A. (2008). Hierro en el sistema suelo-planta. *Depto. Agroquímica y Bioquímica. Facultad de Ciencias. Universidad de Alicante*, 1-22.

- Kalra, Y. P. (1998). *Handbook of Reference Methods for Plant Analysis*. Boston, USA: CRC Press.
- Kass, D. C. L. (1996). *Fertilidad de Suelos*: Euned.
- Kass, D. C. L. (1998). *Fertilidad de Suelos*. San José, Costa Rica: Euned.
- Kausar, H., Sariah, M., Saud, H. M., Alam, M. Z., & Ismail, M. R. (2010). Development of compatible lignocellulolytic fungal consortium for rapid composting of rice straw. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 64(7), 594-600.
- Kaye, J. P., & Hart, S. C. (1997). Competition for nitrogen between plants and soil microorganisms. *Trends in Ecology & Evolution*, 12(4), 139-143.
- Khaliq, A., Abbasi, M. K., & Hussain, T. (2006). Effects of integrated use of organic and inorganic nutrient sources with effective microorganisms (EM) on seed cotton yield in Pakistan. *Bioresource technology*, 97(8), 967-972.
- Kinyua, M., Wald, I., Camacho-Céspedes, F., Izurieta, R., Haas, C. N., & Ergas, S. J. (2016). Does the use of tubular digesters to treat livestock waste lower the risk of infection from *Cryptosporidium parvum* and *Giardia lamblia*? *Journal of Water and Health*, wh2016032.
- Kinyua, M., Zhang, J., Camacho-Céspedes, F., Tejada-Martinez, A., & Ergas, S. (2016). Use of physical and biological process models to understand the performance of tubular anaerobic digesters. *Biochemical Engineering Journal*, 107, 35-44.
- Kirby, R. (2005). Actinomycetes and lignin degradation. *Advances in applied microbiology*, 58, 125-168.
- Kotschi, J. (2015). *A Soiled reputation. Adverse impacts of mineral fertilizers in tropical agriculture*. Germany: WWFGermany-Heinrich Böll Stiftung.
- Kovács-Hostyánszki, A., Espíndola, A., Vanbergen, A. J., Settele, J., Kremen, C., & Dicks, L. V. (2017). Ecological intensification to mitigate impacts of conventional intensive land use on pollinators and pollination. *Ecology letters*, 20(5), 673-689.
- Kremen, C., Iles, A., & Bacon, C. (2012). Diversified farming systems: an agroecological, systems-based alternative to modern industrial agriculture. *Ecology and Society* 17(4): 44.

- Kremen, C., & Miles, A. (2012). Ecosystem services in biologically diversified versus conventional farming systems: benefits, externalities, and trade-offs. *Ecology and Society*, 17(4), 40.
- Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 304(5677), 1623-1627.
- Lambers, H., Chapin, F. S., & Pons, T. L. (2008). *Plant Physiological Ecology*: Springer New York.
- Lansing, S., Martin, J. F., Botero, R. B., Da Silva, T. N., & Da Silva, E. D. (2010). Wastewater transformations and fertilizer value when co-digesting differing ratios of swine manure and used cooking grease in low-cost digesters. *biomass and bioenergy*, 34(12), 1711-1720.
- Larkin, R. P. (2015). Soil health paradigms and implications for disease management. *Annual Review of Phytopathology*, 53, 199-221.
- Lea, P. J., & Morot-Gaudry, J. F. (2001). *Plant Nitrogen*: Springer Berlin Heidelberg.
- Lin, B. B. (2011). Resilience in agriculture through crop diversification: adaptive management for environmental change. *BioScience*, 61(3), 183-193.
- Linkov, I., & Moberg, E. (2011). *Multi-Criteria Decision Analysis: Environmental Applications and Case Studies*: Taylor & Francis.
- Lok, S., & Suárez, Y. (2014). Efecto de la aplicación de fertilizantes en la producción de biomasa de *Moringa oleifera* y en algunos indicadores del suelo durante el establecimiento. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 48(4), 399-403.
- Lombao, A., Martín, A., Barreiro, A., Fonturbel, M., Carballas, T., Vega, J., . . . Díaz-Raviña, M. (2013). Microbial diversity indices in burned soils estimated by Biolog and PLFA techniques. *Flamma*, 4(1), 5-8.
- Lorch, H., Benckieser, G., & Ottow, J. (1995). Basic methods for counting microorganisms in soil and water. *Methods in applied soil microbiology and biochemistry*, 146-161.
- Luna, J. M. (1988). *Influence of soil fertility practices on agricultural pests*. Paper presented at the Proceedings of the Sixth International Science Conference of IFOAM on Global Perspectives on Agroecology and Sustainable Agricultural Systems, Santa Cruz, CA.

- Lynch, D. H., MacRae, R., & Martin, R. C. (2011). The carbon and global warming potential impacts of organic farming: does it have a significant role in an energy constrained world? *Sustainability*, 3(2), 322-362.
- Magdoff, F., & Van Es, H. (2000). *Building soils for better crops: Sustainable Agriculture Network* Beltsville.
- Maheshwari, D. K. (2014). *Composting for sustainable agriculture* (Vol. 3): Springer.
- Mantovi, P., Baldoni, G., & Toderi, G. (2005). Reuse of liquid, dewatered, and composted sewage sludge on agricultural land: effects of long-term application on soil and crop. *Water research*, 39(2), 289-296.
- Mayer, J., Scheid, S., Widmer, F., Fließbach, A., & Oberholzer, H.-R. (2010). How effective are 'Effective microorganisms®(EM)'? Results from a field study in temperate climate. *Applied Soil Ecology*, 46(2), 230-239.
- McGarry, M. G., & Stainforth, J. (1978). *Compost, fertilizer, and biogas production from human and farm wastes in the People's Republic of China*: International Development Research Centre, Box 8500, Ottawa, Canada K1G 3H9.
- Medina Flores, C. M., Loza, T., & Augustín, J. (2014). *Efecto de dosis y aplicaciones edáficas y foliar de microorganismos de montaña con y sin sales minerales en el rendimiento del cacao (Theobroma cacao L.) variedad criolla, municipio San José de Bocay, Jinotega, febrero-mayo del 2014*. (Ing. en Agroecología Tropical), Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, León Nicaragua.
- Mestre, A. (1973). Utilización de la pulpa en almácigos de café. *Avances Técnicos de Cenicafe*, 28, 1-4.
- MINAE & IMN. (2008). *Cambio Climático Costa Rica. Segunda Comunicación: El clima, su variabilidad y cambio climático en Costa Rica*. San José, Costa Rica.: IMN, CRRH.
- MINAE & IMN. (2014). *Tercera comunicación nacional Convención Marco de las Naciones Unidas sobre cambio climático*. San José, Costa Rica: MINAE, IMN, GEF, PNUD.
- Mingyan, Y., Xianlai, Z., & Xiaoqi, Z. (2011). Screening of complex thermophilic microbial community and application during municipal solid waste aerobic composting. *African Journal of Biotechnology*, 10(67), 15163-15169.

- Molina, E. (2007). Análisis de suelos y su interpretación. *San José, CR, CIA-UCR.*
- Molina, E., & Alvarado, A. (2007). Manejo de la acidez y encalado del suelo. In A. A. y. J. Raigosa (Ed.), *Nutrición y Fertilización Forestal en Regiones Tropicales*. San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica: Centro de Investigaciones Agronómicas, Universidad de Costa Rica.
- Mosier, A., Syers, J. K., & Freney, J. R. (2013). *Agriculture and the nitrogen cycle: assessing the impacts of fertilizer use on food production and the environment* (Vol. 65): Island Press.
- Ndonga, R. K., Friedel, J. K., Spornberger, A., Rinnofnor, T., & Jezik, K. (2011). 'Effective Micro-organisms' (EM): An Effective Plant Strengthening Agent for Tomatoes in Protected Cultivation. *Biological Agriculture & Horticulture*, 27(2), 189-203.
- Neset, T. S. S., & Cordell, D. (2012). Global phosphorus scarcity: identifying synergies for a sustainable future. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 92(1), 2-6.
- Nicholls, C. I., & Altieri, M. (2006). Manejo de la fertilidad de suelos e insectos plaga: armonizando la salud del suelo y la salud de las plantas en los agroecosistemas. *Manejo Integrado de Plagas y Agroecología (Costa Rica)*, 77(8), 8-16.
- NRC. (1993). *Sustainable agriculture and the environment in the humid tropics*. Washington DC: National Academy Press.
- ONF. (2013). *Guía Técnica SAF*. Costa Rica: ONF.
- Ortega Navarro, A. (2014). Fincas Integrales: aportes a los servicios ecosistémicos y la calidad de vida de las familias. *Leisa, revista de agroecología*, 30(3), 27.
- Pampuro, N., Bisaglia, C., Romano, E., Brambilla, M., Foppa Pedretti, E., & Cavallo, E. (2017). Phytotoxicity and Chemical Characterization of Compost Derived from Pig Slurry Solid Fraction for Organic Pellet Production. *Agriculture*, 7(11), 94.
- Park, S., Croteau, P., Boering, K., Etheridge, D., Ferretti, D., Fraser, P., . . . Van Ommen, T. (2012). Trends and seasonal cycles in the isotopic composition of nitrous oxide since 1940. *Nature Geoscience*, 5(4), 261-265.
- Parveen, A. A., & Padmaja, C. (2011). Efficacy of fungi and actinomycetes in converting municipal solid waste (MSW) and water hyacinth (WH) into organic manure. *Research on crops*, 12(1), 167-172.

- Paulin, B., & O'Malley, P. (2008). *Compost production and use in horticulture*. Western Australia: Western Australia Agriculture Authority.
- Perfecto, I., Rice, R. A., Greenberg, R., & Van der Voort, M. E. (1996). Shade coffee: a disappearing refuge for biodiversity: shade coffee plantations can contain as much biodiversity as forest habitats. *BioScience*, *46*(8), 598-608.
- Perfecto, I., & Vandermeer, J. (2015). *Coffee Agroecology: A New Approach to Understanding Agricultural Biodiversity, Ecosystem Services and Sustainable Development*: Taylor & Francis.
- Peters, V. E., & Carroll, C. R. (2012). Temporal variation in coffee flowering may influence the effects of bee species richness and abundance on coffee production. *Agroforestry systems*, *85*(1), 95-103.
- Petisco, C., García Criado, L., Vázquez de Aldana, B. R., & García Criado, B. (2008). Efecto de la fertilización en la producción de biomasa aérea y concentraciones de nitrógeno y fósforo en plantas de colza.
- Petkova, G., & Kostov, O. (1996). Microbiological processes under vine-twig composting. *Pochvoznanie, Agrokhimiia y Ekologiya*, *31*(5), 25-28.
- Philpott, S. M., Arendt, W. J., Ambrecht, I., Bichier, P., Diestch, T. V., Gordon, C., . . . SOTO-PINTO, L. (2008). Biodiversity loss in Latin American coffee landscapes: review of the evidence on ants, birds, and trees. *Conservation Biology*, *22*(5), 1093-1105.
- Piemonte, R. (2000). *Il compostaggio. Processo, tecniche e applicazione*: Collana Ambiente.
- Porras Vanegas, C. M. (2006). Efecto de los sistemas agroforestales de café orgánico y convencional sobre las características de suelos en el Corredor Biológico Turrialba-Jiménez, Costa Rica.
- Posada Tobón, C., & Osorio, N. W. (2003). Respuesta de plántulas de café a la fertilización foliar y la aplicación de pulpa de café compostada. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín; Vol. 56, núm. 1 (2003); 1839-1848 2248-7026 0304-2847*.
- R Core Team. (2018). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing.

- Reis, T. H. P., Guimarães, P. T. G., Furtini Neto, A. E., Guerra, A. F., & Curi, N. (2011). Soil phosphorus dynamics and availability and irrigated coffee yield. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 35(2), 503-515.
- Resendez, A. M. (2007). *Elementos Nutritivos. Asimiliación, Funciones, Toxicidad E Indisponibilidad En Los Suelos*: Editorial Libros en Red.
- Rincón, L. E. C., & Muñoz, L. M. M. (2005). Enzimas del suelo: indicadores de salud y calidad. *Acta Biológica Colombiana*, 10(1), 5-18.
- Rodríguez, E., Gamboa, M., Hernández, F., & García, J. (2005). Bacteriología General: Manual de laboratorio. *Universidad de Costa Rica. Facultad de Microbiología*.
- Ronzelli, R., Buff, M. T. C., & Koehler, H. S. (1999). Efficient microorganisms in the cultivation of *Phaseolus vulgaris*. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 42(4), 477-484.
- Rosenani, A., Rovica, R., Cheah, P., & Lim, C. (2016). Growth performance and nutrient uptake of oil palm seedling in prenursery stage as influenced by oil palm waste compost in growing media. *International Journal of Agronomy*, 2016.
- Rügnitz, M. T., Chacón, M. L., & Porro, R. (2009). *Guía para la Determinación de Carbono en Pequeñas Propiedades Rurales* Lima, Perú: Centro Mundial Agroforestal (ICRAF) / Consórcio Iniciativa Amazônica (IA).
- Sadeghian, S. (2008). *Fertilidad del Suelo y nutrición de café en Colombia*. Colombia: FNC-CENICAFE.
- Saha, N., Mukherjee, D., Sen, S., Sarkar, A., Bhattacharaya, K., Mukhopadyay, N., & Patra, P. (2012). Application of highly efficient lignocellulolytic fungi in cocomposting of paddy straw amended poultry droppings for the production of humus rich compost. *Compost science & utilization*, 20(4), 239-244.
- Salazar-Arias, J. (1977). Respuesta de plántulas de café a la fertilización con nitrógeno, fósforo y potasio. *Cenicafe, Chinchina*, 28(2), 61-66.
- Salazar-Arias, J. (2000). Fertilización en almácigos de café *Simposio sobre suelos en la zona cafetera Colombiana*. Chinchiná: Cenicafé.
- Schloter, M. (2014). Effects of different compost amendments on the abundance and composition of alkB harboring bacterial communities in a soil under industrial use contaminated with hydrocarbons. *Frontiers in microbiology*, 5, 96.

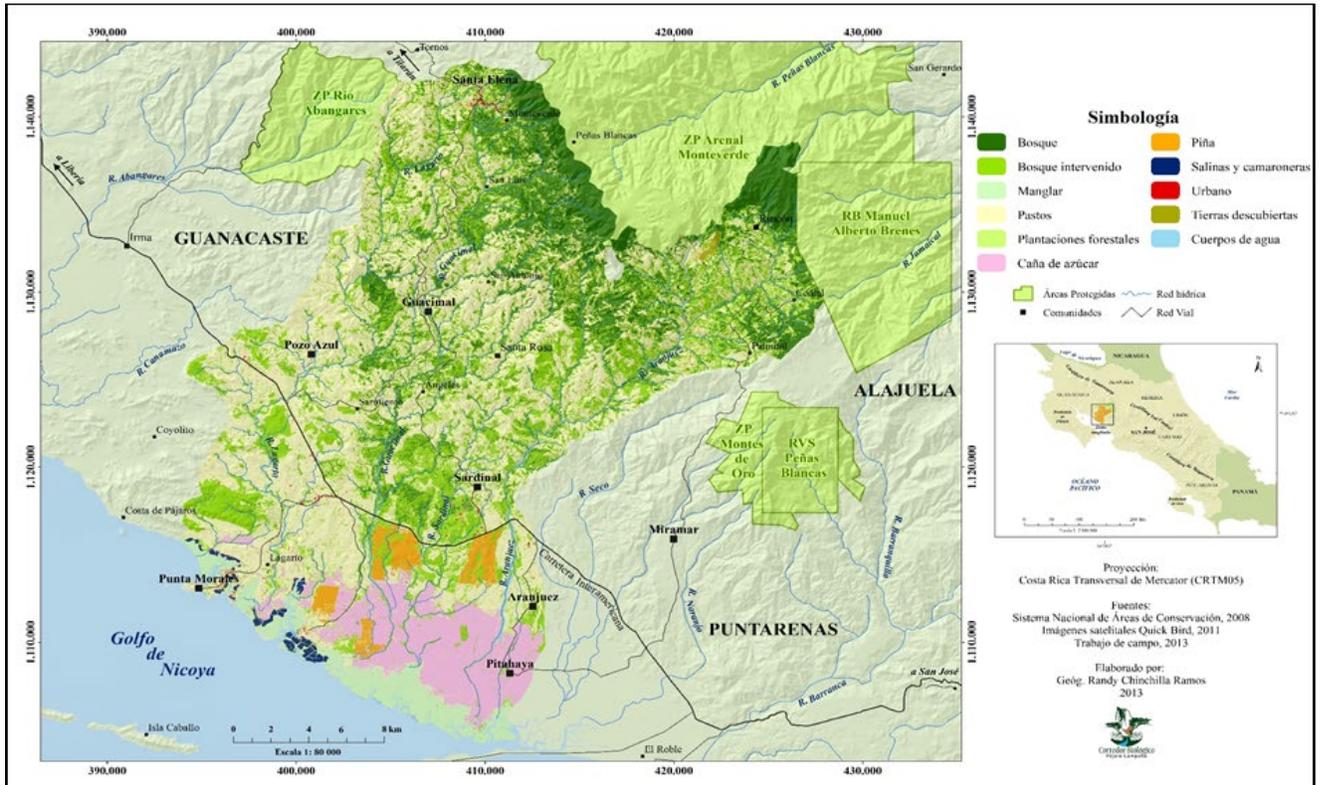
- Sciubba, L., Cavani, L., Negroni, A., Zanaroli, G., Fava, F., Ciavatta, C., & Marzadori, C. (2014). Changes in the functional properties of a sandy loam soil amended with biosolids at different application rates. *Geoderma*, 221, 40-49.
- Scriber, J. M. (1984). Nitrogen nutrition of plants and insect invasion. *Nitrogen in crop production*, 441-460.
- Sevel, L., Nord-Larsen, T., Ingerslev, M., Jørgensen, U., & Raulund-Rasmussen, K. (2014). Fertilization of SRC willow, I: biomass production response. *Bioenergy Research*, 7(1), 319-328.
- Soil Science Society of America. (1996). *Methods of Soil Analysis Part 3: Chemical Methods*. Madison, Wisconsin, USA: Soil Science Society of America Inc., American Society of Agronomy Inc.
- Spellman, F. R., & Whiting, N. E. (2007). *Environmental management of concentrated animal feeding operations (CAFOs)*: CRC Press.
- Sreesai, S., Peapueng, P., Tippayamongkonkun, T., & Sthiannopkao, S. (2013). Assessment of a potential agricultural application of Bangkok-digested sewage sludge and finished compost products. *Waste Management & Research*, 31(9), 925-936.
- Stoffella, P. J., & Kahn, B. A. (2001). *Compost utilization in horticultural cropping systems*: CRC press.
- Stuckey, J. D., Camacho-Céspedes, F., Vargas, J. L., Vargas, G., & Stuckey, S. (2014). Agricultura en Monteverde: hacia la sostenibilidad - actualización 2014. In N. M. Nadkarni & N. T. Wheelwright (Eds.), *Monteverde, Ecología y Conservación de un Bosque Nuboso*. Bowdoin's Scholars' Bookshelf. Book 3.
- Suchini Ramírez, J. G. (2012). *Innovaciones agroecológicas para una producción agropecuaria sostenible en la región del Trifinio*. Turrialba (Costa Rica): CATIE.
- Swift, M. J., Heal, O. W., & Anderson, J. M. (1979). *Decomposition in terrestrial ecosystems* (Vol. 5): Univ of California Press.
- Talaat, N. B., Ghoniem, A. E., Abdelhamid, M. T., & Shawky, B. T. (2015). Effective microorganisms improve growth performance, alter nutrients acquisition and induce compatible solutes accumulation in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.)

- plants subjected to salinity stress. *Plant Growth Regulation*, 75(1), 281-295.  
doi:10.1007/s10725-014-9952-6
- Tam, N., & Tiquia, S. (1994). Assessing toxicity of spent pig litter using a seed germination technique. *Resources, Conservation and Recycling*, 11(1-4), 261-274.
- Tilman, D., Cassman, K. G., Matson, P. A., Naylor, R., & Polasky, S. (2002). Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, 418(6898), 671-677.
- Tiquia, S., Tam, N., & Hodgkiss, I. (1996). Effects of composting on phytotoxicity of spent pig-manure sawdust litter. *Environmental Pollution*, 93(3), 249-256.
- Townsend, A. R., Howarth, R. W., Bazzaz, F. A., Booth, M. S., Cleveland, C. C., Collinge, S. K., . . . Keeney, D. R. (2003). Human health effects of a changing global nitrogen cycle. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 1(5), 240-246.
- Triantaphyllou, E. (2013). *Multi-criteria Decision Making Methods: A Comparative Study*: Springer US.
- Tsvetkov, I., Atanassov, A., Vlahova, M., Carlier, L., Christov, N., Lefort, F., . . . Tchamitchian, M. (2018). Plant organic farming research—current status and opportunities for future development. *Biotechnology & Biotechnological Equipment*, 32(2), 241-260.
- US Composting Council. (2002). *Test methods for the examination of composting and compost*. Reston, Vermont, USA: US Composting Council.
- Van Vliet, P., Bloem, J., & De Goede, R. (2006). Microbial diversity, nitrogen loss and grass production after addition of Effective Micro-organisms®(EM) to slurry manure. *Applied Soil Ecology*, 32(2), 188-198.
- Vance, E. D., Brookes, P. C., & Jenkinson, D. S. (1987). An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil biology and Biochemistry*, 19(6), 703-707.
- Vandermeer, J., van Noordwijk, M., Anderson, J., Ong, C., & Perfecto, I. (1998). Global change and multi-species agroecosystems: concepts and issues. *Agriculture, ecosystems & environment*, 67(1), 1-22.

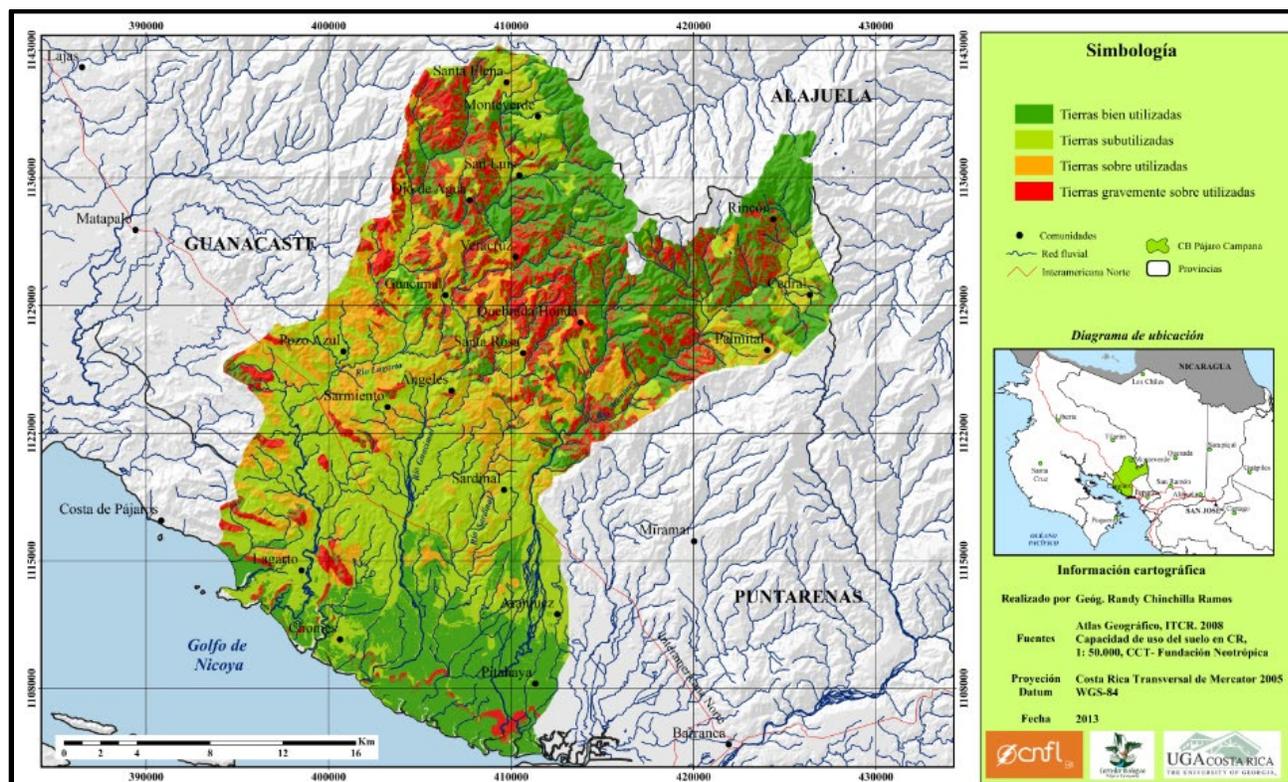
- Varnero, M. T., Rojas, C., & Orellana, R. (2007). Índices de fitotoxicidad en residuos orgánicos durante el compostaje. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal*, 7(1), 28-37.
- Villagra, C., Botero, R., & Quiroga, V. (2006). Evaluación del efecto de los microorganismos eficaces (EM) sobre la composición nutritiva y el consumo de los bloques multinutricionales (BMN). *Tierra Tropical*, 2(2), 99-106.
- Wang, & Keturi, P. H. (1990). Comparative seed germination tests using ten plant species for toxicity assessment of a metal engraving effluent sample. *Water, Air, and Soil Pollution*, 52(3-4), 369-376.
- Wang, H. Y., Fan, B. Q., Hu, Q. X., & Yin, Z. W. (2011). Effect of inoculation with *Penicillium expansum* on the microbial community and maturity of compost. *Bioresource technology*, 102(24), 11189-11193.
- Wei, Z., Xi, B., Zhao, Y., Wang, S., Liu, H., & Jiang, Y. (2007). Effect of inoculating microbes in municipal solid waste composting on characteristics of humic acid. *Chemosphere*, 68(2), 368-374.
- West, P. W. (2015). *Tree and Forest Measurement*: Springer International Publishing.
- Wheeler, T., & von Braun, J. (2013). Climate change impacts on global food security. *Science*, 341(6145), 508-513.
- Wild, B., Schnecker, J., Alves, R. J. E., Barsukov, P., Bárta, J., Čapek, P., . . . Lashchinskiy, N. (2014). Input of easily available organic C and N stimulates microbial decomposition of soil organic matter in arctic permafrost soil. *Soil biology and Biochemistry*, 75, 143-151.
- Wollum, A. (1982). Cultural methods for soil microorganisms. *Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties*(2), 781-802.
- Zhang, Q., Wu, J., Yang, F., Lei, Y., Zhang, Q., & Cheng, X. (2016). Alterations in soil microbial community composition and biomass following agricultural land use change. *Scientific reports*, 6, 36587. doi:10.1038/srep36587
- Zucconi, F. (1981). Evaluating toxicity of immature compost. *BioCycle*, 22(2), 54-57.
- Zucconi, F., & de Bertoldi, M. (1987). Compost specifications for the production and characterization of compost from municipal solid waste *Compost: production, quality and use* (pp. 30-50): Elsevier.

# CAPÍTULO VIII: ANEXOS

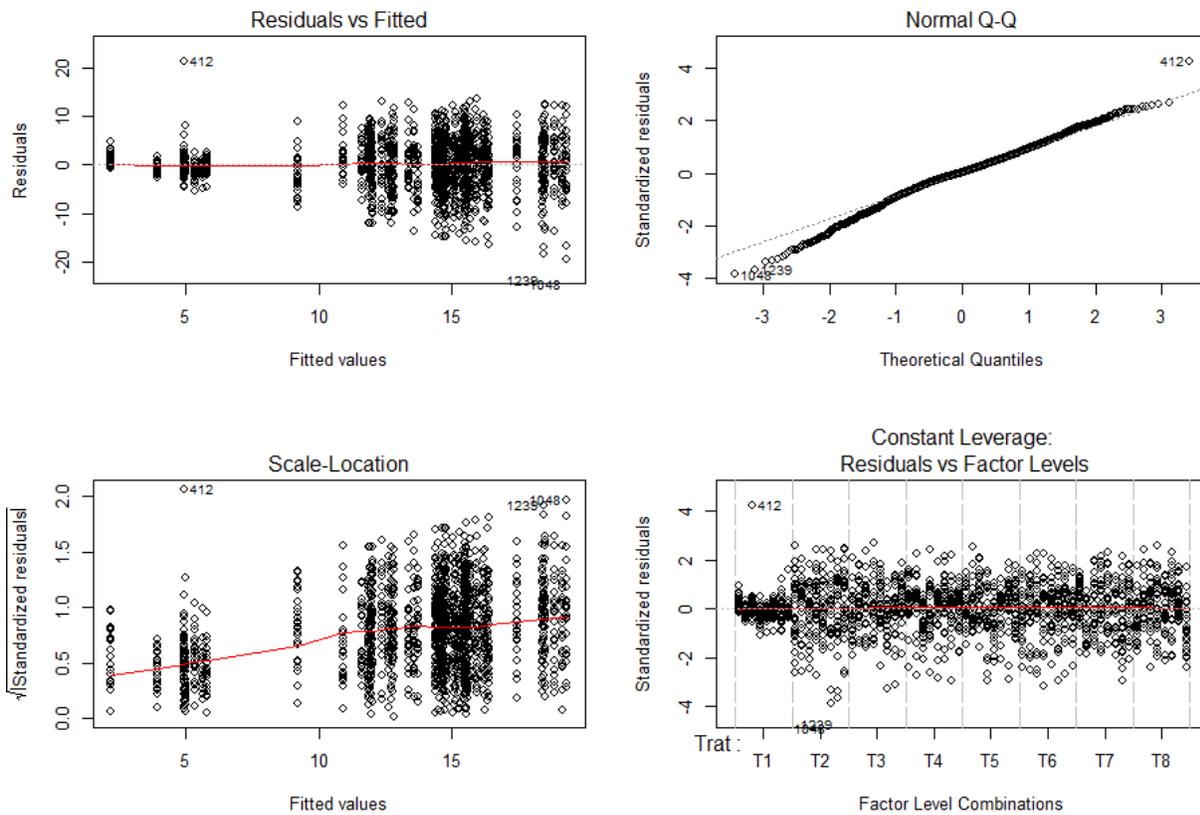
## ANEXO 1. MAPA DE USO ACTUAL DEL SUELO EN EL CBPC. (CHINCHILLA RAMOS, 2015).



ANEXO 2. DIVERGENCIA DE USO DEL SUELO CON RESPECTO A SU CAPACIDAD DE USO. (Chinchilla Ramos, 2015).

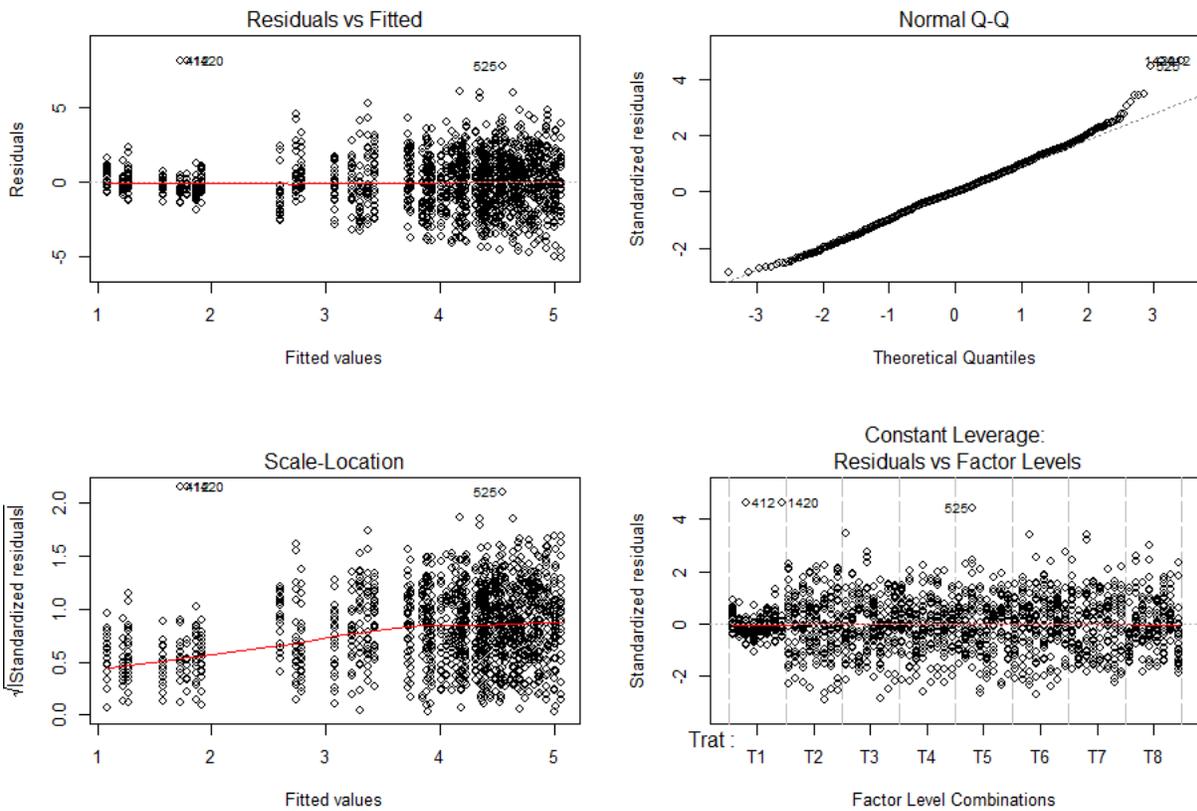


ANEXO 3. COMPROBACIÓN GRÁFICA DE SUPUESTOS PARA EL ANOVA DE 1 VÍA PARA LA VARIABLE PESO SECO POR TRATAMIENTO. R CORE TEAM (2018).

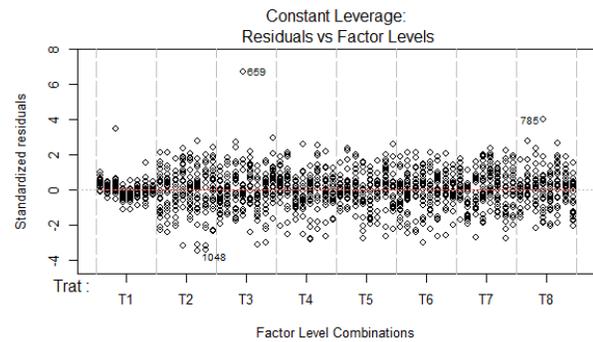
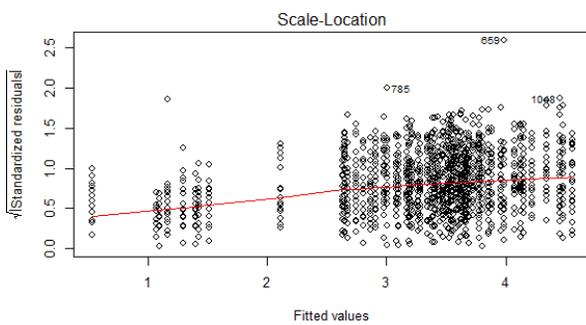
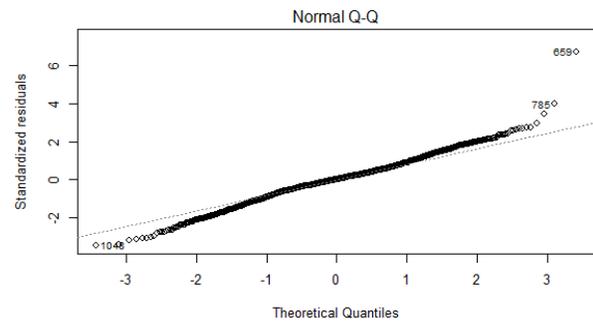
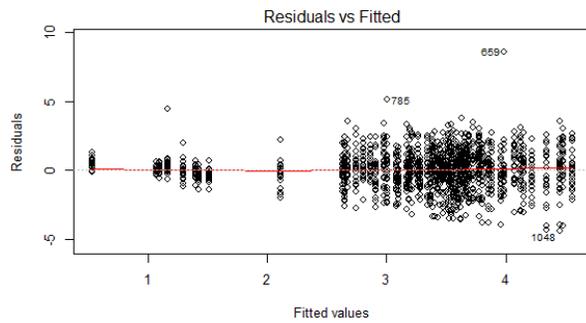


Existe independencia de las muestras, homocedasticidad y normalidad de los datos.

ANEXO 4. COMPROBACIÓN GRÁFICA DE SUPUESTOS PARA EL ANOVA DE 1 VÍA PARA LA VARIABLE PESO SECO RADICULAR POR TRATAMIENTO. R CORE TEAM (2018).



ANEXO 5. COMPROBACIÓN GRÁFICA DE SUPUESTOS PARA EL ANOVA DE 1 VÍA PARA LA VARIABLE PESO SECO DEL TALLO Y LAS RAMITAS POR TRATAMIENTO. R CORE TEAM (2018).



ANEXO 6. COMPROBACIÓN GRÁFICA DE SUPUESTOS PARA EL ANOVA DE 1 VÍA PARA LA VARIABLE PESO SECO FOLIAR POR TRATAMIENTO. R CORE TEAM (2018).

