

**Efecto de distintos sistemas de manejo de coberturas sobre la salud del suelo, en una finca bananera de Siquirres, Limón, Costa Rica.**

**Edgar David Valverde Araya**

**PRÁCTICA DIRIGIDA PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO AGRÓNOMO CON EL GRADO DE LICENCIADO EN  
AGRONOMÍA**

**UNIVERSIDAD DE COSTA RICA**

**FACULTAD DE CIENCIAS AGROALIMENTARIAS**

**ESCUELA DE AGRONOMÍA**

**2021**

Efecto de distintos sistemas de manejo de coberturas sobre la salud del suelo, en una finca bananera de Siquirres, Limón, Costa Rica.

Edgar David Valverde Araya.

PRÁCTICA DIRIGIDA PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO AGRÓNOMO CON EL GRADO DE LICENCIADO EN  
AGRONOMÍA.



DIRECTOR DE PRÁCTICA.

M.Sc. Ronald Alberto Chaves Corea.



MIEMBRO DEL TRIBUNAL.

M.Sc. Rafael Mata Chinchilla.



MIEMBRO DEL TRIBUNAL.

Dr. Róbin Gómez Gómez.



MIEMBRO DEL TRIBUNAL.

M.Sc. Rafael Segura Mena.



DIRECTOR DE ESCUELA.

Dr. Luis Gómez Alpizar.



SUSTENTANTE.

Ing. Agr. Edgar David Valverde Araya.

2021

## **DEDICATORIA**

**Para mis padres, mis hermanos, Belén y mi hija, quienes son mis razón de ser.**

## **AGRADECIMIENTOS**

A mis padres por darme las herramientas con las cuáles he podido enfrentarme a la vida sin importar los obstáculos.

A mi esposa Belén y a nuestra hija Beatríz que me motivan cada día a ser una mejor persona.

A Don Jorge Sandoval y Don Rafael Segura por darme la oportunidad de realizar este trabajo en la Corporación Bananera Nacional S.A., sus consejos y su apoyo siempre han sido incondicionales.

A Don Juan Zúñiga Samuels, César Guillén, Mario Villatoro, Werner Rodríguez, Lidieth Uribe y Miguel Gonzáles, quienes fueron personas cruciales en la propuesta y elaboración de esta investigación.

A Ronald Cháves, Róbin Gómez y Rafael Mata, por sus consejos y orientación para que este trabajo obtuviera la mayor calidad científica posible.

A los asistentes y trabajadores de campo del Eje Relación Suelo-Planta de la Dirección de Investigaciones de CORBANA S.A., por su apoyo y trabajo en cada una de las variables evaluadas en esta práctica dirigida.

Finalmente a todas las personas de la Corporación Bananera Nacional S.A., y la Universidad de Costa Rica que fueron parte de este proceso con su ayuda, apoyo y palabras de aliento brindadas.

## TABLA DE CONTENIDOS.

<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1. OBJETIVO GENERAL:.....	3
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS: .....	3
<b>2. REVISIÓN DE LITERATURA. ....</b>	<b>3</b>
2.1. Generalidades del cultivo de banano. ....	3
2.2. Salud del suelo.....	4
2.3. Indicadores físicos.....	5
2.4. Indicadores químicos.....	6
2.5. Indicadores biológicos. ....	7
2.6. Sistemas de coberturas vivas en banano.....	8
<b>3. MATERIALES Y MÉTODOS. ....</b>	<b>10</b>
3.1. Área de Estudio: .....	10
3.2. Tratamientos y diseño experimental:.....	11
3.3. Variables evaluadas. ....	12
3.3.2.1. Resistencia a la penetración: .....	13
3.3.2.2. Densidad aparente:.....	14
3.3.2.3. Temperatura del suelo: .....	15
3.3.2.4. Erosión Hídrica: .....	15
3.3.2.5. Textura:.....	16
3.3.3.1. Aporte de materia seca: .....	18
3.3.3.2. Materia Orgánica: .....	20
3.3.3.3. pH: .....	20
3.3.3.4. Fertilidad (Ca, Mg, K, P, Fe, Cu, Zn, Mn y B): .....	20
3.3.4.1. Biomasa microbiana del suelo:.....	21
3.3.4.2. Respiración del suelo: .....	21

3.3.4.3. Diversidad de microartrópodos del suelo:.....	22
<b>4. RESULTADOS. ....</b>	<b>25</b>
4.1. Inventario de coberturas:.....	25
4.2. Variables físicas:.....	25
4.3. Variables químicas:.....	30
4.4. Variables biológicas:.....	33
4.5. Análisis multivariado de componentes principales.....	36
<b>5. DISCUSIÓN. ....</b>	<b>39</b>
5.1. Inventario de coberturas.....	39
5.2. Variables físicas. ....	41
5.3. Variables químicas.....	45
5.4. Variables biológicas.....	48
5.5. Análisis Multivariado de Componentes Principales.....	50
<b>6. CONCLUSIONES. ....</b>	<b>51</b>
<b>7. LITERATURA CITADA. ....</b>	<b>52</b>
<b>8. ANEXOS.....</b>	<b>61</b>

## Resumen

El cultivo del banano en Costa Rica tiene un alto valor económico y social, por lo que la sostenibilidad en la producción es vital para el futuro del cultivo y el trabajo de las personas involucradas en este sector. El suelo ha tomado importancia por ser el lugar de anclaje y el medio de desarrollo de las plantas de banano, y su pérdida representa un impacto económico directo en los productores, ya que la capa superficial contiene la mayor cantidad de nutrientes y es la parte más sensible a el impacto de la erosión, altas temperaturas y detrimento de las actividades biológicas necesarias para la explotación del cultivo. Es por esto que el objetivo de este trabajo se basó en evaluar las diferencias en variables físicas, químicas y biológicas del suelo, en distintos sistemas de coberturas del suelo, se muestreó de abril a noviembre en los tratamientos de libre crecimiento de coberturas, coberturas con control químico, coberturas con control mecánico y coberturas con control mecánico más la aplicación de viales, con cinco repeticiones de cada uno en parcelas de 300 metros cuadrados. Se evaluó la resistencia a la penetración, densidad aparente, temperatura, textura, erosión hídrica, aporte de materia seca, materia orgánica, pH, fertilidad, biomasa microbiana, respiración del suelo y diversidad de microartrópodos. Se encontró diferencias significativas en la resistencia a la penetración del suelo en los primeros diez centímetros ( $p < 0,05$ ), con valores de 0,4 a 0,64 MPa para el tratamiento de libre crecimiento en comparación a los demás tratamientos (0,44-0,72 MPa), hubo una temperatura significativamente mayor (0,5 °C) del tratamiento con control químico respecto a los demás tratamientos, se obtuvieron diferencias significativas de hasta 2 toneladas por hectárea de suelo erosionado del tratamiento con control químico respecto a los demás tratamientos y finalmente se determinaron diferencias significativas de hasta  $13 \mu\text{mols}^{-1}\text{m}^{-2}$  de  $\text{CO}_2$  en la variable de respiración del suelo entre los tratamientos con coberturas respecto al tratamiento con control químico. En el análisis de componentes principales la variabilidad de los tratamientos, no se vio reflejada en los primeros dos componentes, demostrando que variables como la materia orgánica y la densidad aparente pueden mostrar cambios en el tiempo. Estos resultados demuestran algunos de los beneficios que otorgan el uso de coberturas vivas en el suelo, conservando la capa superficial económicamente más importante, disminuyendo la

afectación de la vida microbiana y contribuyendo a la sostenibilidad del sistema de cultivo.

### **Abstract**

Banana cultivation in Costa Rica has a high economic and social value, so sustainability in production is vital for the future of the cultivation and the work of the people involved in this sector. The soil has become important because it is the place of anchorage and the means of development of banana plants, and its loss represents a direct economic impact on producers, since the surface layer contains the greatest amount of nutrients and is the most sensitive to the impact of erosion, high temperatures and the detriment of the biological activities necessary for the exploitation of the crop. It is for this reason that the objective of this work was based on evaluating the differences in physical, chemical, and biological variables of the soil, in different systems of cover crops, it was sampled from April to November in the treatments of free growth of covers, cover crops with chemical control, cover crops with mechanical control and cover crops with mechanical control plus the application of biol, with five repetitions of each one in plots of 300 square meters. Penetration resistance, apparent density, temperature, texture, water erosion, contribution of dry matter, organic matter, pH, fertility, microbial biomass, soil respiration and diversity of microarthropods were evaluated. Significant differences were found in resistance to soil penetration in the first ten centimeters ( $p < 0.05$ ), with values of 0.4 to 0.64 MPa for the free-growing treatment compared to the other treatments (0, 44-0.72 MPa), there was a significantly higher temperature ( $0.5^{\circ} \text{C}$ ) of the treatment with chemical control compared to the other treatments, significant differences of up to 2 tons per hectare of eroded soil were obtained from the treatment with chemical control with respect to the other treatments and finally significant differences of up to  $13 \mu\text{mols}\cdot\text{m}^{-2}$  of  $\text{CO}_2$  were determined in the soil respiration variable between the treatments with cover crops with respect to the treatment with chemical control. In the principal component analysis, the variability of the treatments was not reflected in the first two components, showing that variables such as organic matter and apparent density can show changes over time. These results demonstrate some of the benefits provided using living

cover crops, conserving the most economically important surface layer, reducing the impact on microbial life and contributing to the sustainability of the cultivation system.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Distribución de las repeticiones de cada tratamiento y el testigo en el área de estudio. ....	12
<b>Figura 2.</b> Instrumento Penetrologger ML3 versión 6,08 utilizado para medir resistencia a la penetración. ....	13
<b>Figura 3.</b> Instrumento “Martinelli”, utilizado para extraer los cilindros con las muestras. .	14
<b>Figura 4.</b> Trampas para medir escorrentía y erosión del suelo, en este caso la canoa es el recolector de la trampa. ....	16
<b>Figura 5.</b> Instrumentos utilizados para realizar el método de Bouyoucos. ....	17
<b>Figura 6.</b> Triángulo de texturas. (Fuente: U.S.D.A., 1977) .....	18
<b>Figura 7.</b> Marco de 1 m <sup>2</sup> utilizado para limitar la muestra de material vegetativo. ....	19
<b>Figura 8.</b> Detalle del instrumento Soil Respiration Chamber, adaptado al LCi-SD que se utilizó para medir la respiración del suelo. ....	22
<b>Figura 9.</b> Embudos de Berlesse-Tulberg, utilizados para recolectar los microartrópodos de las muestras. ....	23
<b>Figura 10.</b> Resistencia a la penetración del suelo (Mpa), de los tratamientos y el testigo (libre crecimiento) hasta 60 cm de profundidad. ....	26
<b>Figura 11.</b> Temperatura promedio del suelo de los distintos tratamientos y el testigo (libre crecimiento), para cuatro fechas de evaluación. ....	27
<b>Figura 12.</b> Erosión semanal acumulada para los distintos tratamientos y el testigo (libre crecimiento), en nueve fechas de evaluación. ....	28
<b>Figura 13.</b> Escorrentía semanal acumulada para los distintos tratamientos y el testigo (libre crecimiento), en nueve fechas de evaluación. ....	29
<b>Figura 14.</b> Biomasa microbiana del suelo medido (mg C/Kg de suelo), para los distintos tratamientos y el testigo (libre crecimiento). ....	34
<b>Figura 15.</b> Respiración del suelo medido como flujo molar de CO <sub>2</sub> (μmols <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> ), para los distintos tratamientos y el testigo (libre crecimiento.) .....	35
<b>Figura 16.</b> Distribución ortogonal del análisis de Componentes principales (ACP) de los parámetros analizados. Los componentes uno, dos y tres explican el 53,6% de la variabilidad total. ....	38

## LISTA DE CUADROS

<b>Cuadro 1.</b> Levantamiento de coberturas de los tratamientos control mecánico y control mecánico + biol. ....	25
<b>Cuadro 2.</b> Densidad aparente del suelo en los distintos tratamientos y el testigo (Libre crecimiento). ....	27
<b>Cuadro 3.</b> Porcentajes de arena, limo y arcilla de los distintos tratamientos y el testigo (libre crecimiento). ....	30
<b>Cuadro 4.</b> Cantidad de materia seca, Nitrógeno, Fósforo, Potasio, Calcio, Magnesio y Azufre, acumulados en las coberturas de los tratamientos de control mecánico y control mecánico + biol. ....	30
<b>Cuadro 5.</b> Porcentaje de materia orgánica de los distintos tratamientos y el testigo (libre crecimiento). ....	31
<b>Cuadro 6.</b> Valor de pH de los distintos tratamientos y el testigo (libre crecimiento). ....	32
<b>Cuadro 7.</b> Valores de fertilidad del suelo en los distintos tratamientos y el testigo (libre crecimiento). ....	33
<b>Cuadro 8.</b> Cantidad promedio de individuos recolectados de las familias más abundantes de microartrópodos identificados. ....	36
<b>Cuadro 9.</b> Abundancia relativa e índice de diversidad de Shannon-Wiener para determinar la diversidad de familias de microartrópodos encontrados en los distintos tratamientos y el testigo (Libre crecimiento). ....	36
<b>Cuadro 10.</b> Auto vectores de las variables analizadas para los tres primeros componentes principales. ....	39

## 1. INTRODUCCIÓN

El suelo es un material mineral u orgánico no consolidado, agregado a la superficie inmediata de la tierra y que sirve como medio natural para el crecimiento de las plantas terrestres (SSSA, 2008). Se origina en respuesta a condiciones físicas, químicas, biológicas y ambientales que actúan sobre residuos orgánicos, materiales geológicos y productos antropogeomórficos (Chesworth, 2008).

En el 2015, denominado el año Internacional del Suelo, distintas organizaciones tomaron el tema de la conservación del recurso suelo como de alta importancia para la seguridad alimentaria, razón por la cual, la Alianza Mundial por el Suelo (AMS) y la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura (FAO), generaron un primer informe sobre el estado mundial del recurso suelo, donde enfatizaron que para América Latina y el Caribe, las amenazas de mayor impacto son la erosión del suelo, el cambio de carbono orgánico, el desequilibrio de nutrientes, la pérdida de la biodiversidad, la compactación y la contaminación (FAO y GTIS, 2015). La AMS y LA FAO indican que, sin un plan para solventar de manera sostenible estos problemas, la seguridad alimentaria estaría en riesgo para las generaciones futuras (FAO y GTIS, 2015).

Es por esto que una de las estrategias que se llevan a cabo para mejorar la salud del suelo es el manejo de coberturas vivas, si bien es cierto que algunas plantas son consideradas malezas nocivas, para la mayoría de los sistemas de producción, traen beneficios al ser parte del equilibrio de las cadenas tróficas de los ecosistemas (Rivera *et al.*, 2010). Las plantas nativas utilizadas como coberturas del suelo han sido ampliamente utilizadas por productores de banano en el caribe de Costa Rica, ya que aportan beneficios al cultivo principal, con un menor costo de establecimiento (Gómez-Gómez *et al.*, 2017). Dentro de un sistema de coberturas se encuentran diversas plantas que brindan beneficios al cultivo, un claro ejemplo ha sido lo investigado en *Geophila macropoda*, que además de hospedar depredadores y parasitoides de plagas, es un importante indicador de condiciones de alta humedad del suelo, así como, una planta eficiente para prevenir la pérdida de suelo por erosión hídrica (Rojas, 2011).

El cultivo de banano en Costa Rica, como producto exportación, data del año 1872 en el Valle de Zent (Soto, 1992), y a partir de la década de los años 60 y como resultado

de la denominada “revolución verde”, el uso de herbicidas para mantener el suelo descubierto ha sido una práctica rutinaria (Sánchez, 2018). Sin embargo, el sector bananero ha investigado por medio de CORBANA S.A, el impacto y sostenibilidad del uso de herbicidas, buscando alternativas rentables para proteger la salud del suelo (Brenes *et al.*, 2016).

Una práctica dirigida en el cultivo de banano demostró que el suelo desnudo permite una mayor pérdida de nutrientes por lixiviación, transforma la estructura del suelo y sufre una disminución del espacio poroso, como consecuencia de la compactación, lo que afecta la oxigenación necesaria para el metabolismo de las poblaciones microbianas (Ortega, 2013).

Zaconeta (2000), indica que las plantas consideradas como “malezas”, pueden ser utilizadas como indicadores de diferentes grados de fertilidad, por lo que, si las condiciones del suelo cambian, ya sean de forma positiva o negativa, la frecuencia de aparición de estas plantas también, sin embargo, se necesita mayor investigación, que demuestre que no todas las plantas arvenses son competidoras. Por lo que es necesario estudiar las características físicas, químicas y biológicas del suelo en el que se desenvuelven, y medir si los cambios en estas variables pueden ser asociadas a la frecuencia y distribución de las coberuras dentro de las áreas de cultivo (Araya *et al.*, 2014).

Son muchos los beneficios que aportan un programa de coberturas a los sistemas de cultivo, entre ellos pueden ser utilizadas como indicadores, prevenir pérdidas de suelo, disminuir el costo del mantenimiento de drenajes, mantener la humedad por mayores períodos en época seca, así como, funcionar como un tampón a los cambios bruscos de temperaturas en el suelo. Sin embargo, estos datos aún no se tienen realmente cuantificados, por lo que es de gran importancia llevar a cabo una investigación en el cultivo de banano, dada su importancia económica para el país.

### **1.1. OBJETIVO GENERAL:**

- Determinar el efecto de distintos sistemas de manejo de coberturas sobre la salud del suelo, en una finca bananera de Siquirres, Limón, Costa Rica.

### **1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS:**

- Determinar el efecto de distintos sistemas de manejo de coberturas, sobre cinco variables físicas del suelo, en una finca bananera de Siquirres, Limón, Costa Rica.
- Determinar el efecto de distintos sistemas de manejo de coberturas, sobre cuatro variables químicas del suelo, en una finca bananera de Siquirres, Limón, Costa Rica.
- Determinar el efecto de distintos sistemas de manejo de coberturas, sobre tres variables biológicas del suelo, en una finca bananera de Siquirres, Limón, Costa Rica.

## **2. REVISIÓN DE LITERATURA.**

### **2.1. Generalidades del cultivo de banano.**

La industria bananera en Costa Rica tiene una enorme importancia económica y social, ya que generó aproximadamente 40000 empleos directos y 100000 indirectos (76% de la mano de obra en la provincia de Limón), y \$1024,1 millones (8.8% de las exportaciones totales del país) para el 2018, en aproximadamente 43.050 hectáreas de producción (CORBANA, 2019).

Las condiciones ideales para el establecimiento óptimo del cultivo de banano son, temperaturas entre los 20 °C y 30 °C, temperatura media anual mayor a 18 °C, precipitación mayor a los 1500 mm anuales, menos de 3 meses de duración de la estación seca, pendiente menor al 8%, áreas sin riesgo de inundación, drenajes de moderados a

buenos, suelos con más de 75 cm de profundidad, carbono orgánico mayor al 1,5% y una conductividad eléctrica menor a 2 ohms/cm (Gowen, 1995).

En años recientes, el Departamento Relación Suelo-planta del Centro de Investigaciones de CORBANA S.A, ha realizado y colaborado en distintas investigaciones tanto institucionales, como interinstitucionales con prácticas dirigidas de estudiantes, que han enfocado sus temas de trabajo en la protección del suelo y los beneficios que estos tipos de manejo brinden con tal de mejorar la salud del suelo y la sostenibilidad de la producción bananera (Sánchez, 2018; Ortega, 2013).

## **2.2. Salud del suelo.**

La definición de salud del suelo ha sido un tema de controversia y discusión entre investigadores, y en muchos casos es utilizada como sinónimo de calidad de suelo, por lo que es importante aclarar el contexto de estos términos y los distintos pensamientos que los definen.

Karlen *et al.*, 1997, citado por Maddonni *et al.*, 1999, define la calidad del suelo como “la capacidad de un tipo específico de suelo para funcionar dentro de los límites de los ecosistemas naturales o gestionados, manteniendo la productividad de las plantas y los animales, conservando o mejorando la calidad del agua y el aire, y apoyando la salud y vivienda humana”, este sin duda es un contexto más integral ya que incluye al ser humano dentro del sistema de producción. Por su parte Doran y Parkin (1996), definieron la salud del suelo como “la capacidad de un suelo para funcionar dentro de un límite de ecosistema y uso de la tierra, para sostener la productividad biológica, la calidad ambiental y promover la salud de las plantas y los animales”.

Es por esto que autores como Van Bruggen y Semenov (2000) sugieren un nuevo pensamiento hacia el término de suelo saludable el cual tiene resistencia al estrés, una alta diversidad biológica y ciclos internos de altas cantidades de nutrientes, y que se adapta a la corriente de sostenibilidad que se le quieren dar a los sistemas de producción recientes.

Finalmente FAO (2011), define la salud del suelo como la capacidad de este para funcionar como un sistema vivo, contemplando que cualquier factor físico, químico o

biológico que se encuentre en detrimento, implica un posible problema de salud para el suelo; además, la misma publicación insiste en abandonar las prácticas insostenibles actuales, en favor de la gestión de la tierra y en generar un cambio de concepto con tal de que las generaciones futuras constituyan la base para la intensificación sostenible de la producción agrícola.

En la producción de cultivos a nivel mundial, la salud del suelo se mide mediante una serie de indicadores químicos, físicos y biológicos del suelo, que permiten orientar las técnicas del cultivo hacia un manejo más sostenible. Determinar los indicadores más adecuados para un tipo de suelo y cultivo en especial, es una herramienta útil para la toma de decisiones en la agricultura y tiene la ventaja de mejorar constantemente tanto los métodos, como los equipos utilizados para este fin, con el objetivo de obtener mejores resultados para la producción de cultivos en el mediano y corto plazo.

### **2.3. Indicadores físicos.**

La resistencia a la penetración es una variable fácil de medir, siendo un importante indicador de la salud del suelo, al mostrar el esfuerzo que deben realizar las raíces para llegar a capas más profundas. Existen distintos límites dentro de la literatura para la resistencia a la compactación de raíces. Forsythe y Tafur, (1985); Forsythe (1997), determinaron que para suelos y cultivos en general, límites desde 0 a 0,6 MPa se consideran excelentes para el desarrollo de raíces, 0,7-1,2 MPa aceptable, 1,3-2,5 MPa no aceptable y mayor a 2,5 MPa no hay penetración efectiva del suelo por parte de las raíces.

La densidad aparente es un indicador de los más utilizados para medir la compactación del suelo y el impedimento que esto pueda causar a la infiltración vertical del agua en el suelo, sin embargo, esta es una variable que cambia poco en el tiempo. Varela *et al.*, (2011), no encontraron diferencias en la densidad aparente, al utilizar un año completo de cultivos de cobertura en el cultivo de avena en rotación con soya. Campitelli *et al.*, (2010), encontraron altas correlaciones en el aumento de la densidad aparente y la disminución de contenidos de materia orgánica, en el cultivo convencional de soya, provocando susceptibilidad a la erosión, y un evidente deterioro de la salud del

suelo. Castiglioni *et al.*, (2016), en coberturas de los cultivos de trigo y soya, encontraron una disminución significativa de densidad aparente en el estrato superior del suelo, un aumento de porosidad en el mismo estrato y una mayor estabilidad de agregados estructurales.

Trojer (1966) y Forsythe (2002) elaboraron escalas mínimas y máximas absolutas, caracterizando los límites críticos de temperatura del suelo en la faja ecuatorial, donde especifica que el rango de temperatura media anual, para banano de exportación es entre 24-35 °C. Sin embargo, investigaciones recientes como la de Pattison y Lindsay (2006) en Queensland, Australia, determinaron que el rango óptimo para el crecimiento de la raíz de banano se encuentra entre 22-25 °C; temperaturas menores a 22 °C retrasan el crecimiento y por debajo de 13°C se detiene por completo. En el caso de temperaturas altas Fischer *et al.*, (2014), indican que es la deficiencia de oxígeno la que causa inhibición del crecimiento radical, debido a las condiciones cambiantes para el intercambio gaseoso del suelo.

#### **2.4. Indicadores químicos.**

El aporte de biomasa de las coberturas al sistema aumenta los contenidos de carbono en el suelo, además, contrarrestan el efecto de las altas temperaturas en la superficie del suelo y aumentan los contenidos de agua útil en el suelo (Fernández *et al.*, 2012).

El pH es un importante indicador de la salud de los suelos, ya que limita la disponibilidad de nutrientes y la vida microbiana, los valores de pH promedio fluctúan entre 4,1 y 7,9 tanto para la zona noreste como sureste del Caribe; la materia orgánica es un componente esencial para el equilibrio de las comunidades tróficas del suelo, su mineralización permite mejorar características físicas del suelo como la compactación, para los suelos del noroeste y sureste del Caribe de Costa Rica, el valor medio es de 1,7%, con un mínimo de 0,2 y un máximo de 8,2 (Arias *et al.*, 2010a).

La fertilidad del suelo es una variable determinante en la producción agrícola, valores extremos pueden causar deficiencias o intoxicaciones en las plantas, los suelos bananeros de la zona Caribe de Costa Rica se pueden agrupar de acuerdo con su mineralogía en suelos metahalosíticos (región noroeste) y suelos esmectíticos (región

sureste) y el límite geográfico entre estas dos unidades mineralógicas lo definen los causes de los ríos Silencio, Vueltas y Parismina (Arias *et al.*, 2003). Los niveles críticos para estimar la fertilidad de un suelo dedicado al cultivo de banano tanto para Mehlich 3 como para KCl-Olsen, se considera un rango óptimo para Calcio entre 5,0-20 cmolL<sup>-1</sup>; Magnesio entre 2,3-10 cmolL<sup>-1</sup> y Potasio entre 0,6-1 cmolL<sup>-1</sup>. Ferrera y Alarcón (2001), explican que el reciclaje de la materia orgánica, producto de los residuos de cosecha, permite el mejoramiento de las características del suelo cuando se incorporan en éste y se exponen a los procesos de mineralización mediante reacciones de oxidación y reducción, favorecidos por la humedad, la temperatura, el pH, la profundidad del suelo y la aireación. Estos procesos provocan que los nutrientes contenidos en los residuos sean transformados de una forma orgánica a una forma inorgánica, lo cual permite su liberación y disponibilidad para las plantas (Arias *et al.*, 2010b).

## **2.5. Indicadores biológicos.**

La biomasa microbiana es un indicador de la cantidad de vida biológica bajo la superficie del suelo, valores bajos de esta variable corresponden a suelos con una baja actividad biológica, así mismo, la respiración del suelo determina el intercambio gaseoso de la vida microbiana del suelo y tiene la facilidad de ser una medición directa in situ, utilizando equipos de determinación indirecta de CO<sub>2</sub> en el suelo, se han encontrado mayores valores de biomasa microbiana y respiración de suelo en praderas sin influencia del hombre, respecto a los suelos que se encontraban bajo un cultivo, evidenciando una degradación y pérdida de calidad del suelo por el uso agrícola (Serri *et al.*, 2018).

Ferrera y Alarcón (2001), indican que el manejo de diversas prácticas culturales (establecimiento de leguminosas en rotación de cultivos, abonos verdes, aplicación de materia orgánica) permite que los sistemas agrícolas requieran menos entradas externas de energía, favoreciendo la conservación del suelo. Además, estas prácticas influyen en la actividad microbiana aumentando la diversidad de microorganismos, de tal forma que se establezcan diversas relaciones tróficas que contribuyan a la sanidad y fertilidad de los suelos. Paolini (2018) considera que la liberación de CO<sub>2</sub> y C generados por la

descomposición de los residuos orgánicos metabolizados por los microorganismos del suelo, es considerado un parámetro de amplio uso como indicador de actividad biológica.

Uribe (2006), indica las principales actividades benéficas realizadas por los microorganismos del suelo, tales como, la disponibilidad de nutrientes transformando N del aire en formas utilizables por las plantas, las asociaciones con raíces de plantas que favorecen la obtención de nutrientes (hongos formadores de micorrizas, fijación de Nitrógeno), la producción de quelatantes orgánicos, la descomposición de residuos, la solubilización de fosfatos, la mineralización de N, S, P orgánicos y las reacciones de óxido-reducción; juegan un rol importante en la protección de plantas suprimiendo enfermedades, controlando de forma biológica patógenos, malezas, poblaciones de nemátodos e insectos plaga y aumentando la tolerancia a la sequía. Los microorganismos además inactivan contaminantes al reducir la toxicidad de algunos metales y plaguicidas, o biodegradando sustancias contaminantes, participan en la formación de agregados, humus, sustancias cementantes y unen partículas por medio de hifas en el caso de muchos hongos; además estimulan el crecimiento de las plantas por la síntesis de hormonas, enzimas y vitaminas, y protegen a las raíces del ataque de patógenos.

## **2.6. Sistemas de coberturas vivas en banano.**

Pocas investigaciones han profundizado en los beneficios que el uso de coberturas le provee al cultivo del banano. Sánchez (2018) comparó sistemas sin cobertura contra sistemas dónde se utilizan coberturas, y encontró que las coberturas promueven la diversidad de la microflora del suelo, así como, disminución de la compactación causada por el paso constante de los trabajadores de campo. Brenes *et al.*, (2016) midieron la erosión de sistemas convencionales, donde se aplica control químico contra sistemas donde se utiliza *Geophila macropoda* como cobertura, y encontró enormes diferencias, ya que esta planta de porte bajo sirve de trampa para la sedimentación, por lo que en eventos de lluvia las partículas del suelo experimentan mayor dificultad para avanzar.

Ortega (2013), determinó los beneficios que aportan los microorganismos aplicados en bioles, ya que mejoran la diversidad y salud del suelo, razón por la cual, ha sido un complemento en muchos sistemas de producción donde se utilizan coberturas en banano. Se ha venido planteando un sistema de coberturas distinto al tradicional, donde

se establecía una sola especie dominante, la idea es establecer plantas propias de la zona, denominadas “coberturas nativas”, ya que disminuye problemas en el manejo y control de especies para que sólo haya una dominante, además, que promueve la diversidad del sistema que tiene interacción con otros seres tales como controladores biológicos ya sea parasitoides o depredadores.

Investigadores de la región, han desarrollado trabajos con resultados satisfactorios utilizando indicadores de calidad del suelo en el cultivo de banano, sin embargo, han tomado como objetivo principal la producción (Villarreal *et al.*, 2013), incluso instituciones en conjunto como la Red Internacional para el Mejoramiento del Banano y el Plátano (INIBAP), la Corporación Bananera Nacional S.A (CORBANA) y la Universidad de Costa Rica identificaron indicadores físicos, químicos y biológicos de calidad y salud del suelo, pero el objetivo de la investigación fue encontrar factores críticos que afectaran el crecimiento y producción del cultivo de banano (Delgado *et al.*, 2010). Estos resultados abren la oportunidad de utilizar dichos indicadores como punto para comparar y diferenciar el potencial que tiene el uso de coberturas en las plantaciones, y su efecto en la salud del suelo con tal de orientar el manejo hacia la sostenibilidad de la producción.

El objetivo de esta investigación es medir variables físicas, químicas y biológicas, de cuatro distintos sistemas de cobertura, con el fin de determinar el efecto sobre la salud del suelo, en una finca bananera ubicada en Siquirres, Limón, Costa Rica.

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS.

#### 3.1. Área de Estudio:

El presente experimento se ubicó en la finca bananera San Pablo, en el cantón de Siquirres, provincia de Limón; específicamente en la tapa (“tapa” es un término utilizado en las bananeras para nombrar el lado en el que se encuentra un área del cable) izquierda del cable 15 sur (83° 73' 40" O y 10° 36' 09" N). El área estaba constituida por cinco domos (“domo” es un término utilizado en las bananeras para nombrar al área que se encuentra entre dos canales terciarios) de aproximadamente 300 m<sup>2</sup> cada uno. El suelo pertenece al orden de los Inceptisoles, y está caracterizado por Mata y Sandoval (2016), como Fluvaquentic Eutrudepts, clase II (texturas moderadamente finas a livianas), posee seis horizontes clasificados como A<sub>p</sub> (0-19 cm), AB (19-45 cm), B<sub>w</sub> (45-70 cm), C<sub>1</sub> (70-115 cm), A<sub>b</sub> (115-125 cm), 2C<sub>2</sub> (125-200 cm), el horizonte C<sub>1</sub> contiene varios subhorizontes, pero su principal característica son las redoximórficas, el horizonte 2C<sub>2</sub> contiene varios subhorizontes pero se muestra como uno sólo, la tabla de agua se presentó a los 180 cm de profundidad, drenaje clasificado como pobremente drenado, la textura del horizonte A<sub>p</sub> es clasificada como Franco arcillo limoso, densidad aparente de 1,1 g cm<sup>-3</sup>, conectividad de poros de 0,462 m\*s<sup>-1</sup>, conductividad hidráulica de 471 cm h<sup>-1</sup>, con un 6% de agua útil (Anexo 1), pH 5,65 considerada dentro del rango adecuado para el cultivo de banano, alta fertilidad (Laboratorio de suelos y foliares, CORBANA S.A.), con un bajo porcentaje de materia orgánica del 1,6%, además, en el área se realizó un muestreo microbiológico dando positivo a Alfa y Beta proteobacterias, *Pseudomonas fluorescens*, Actinobacterias, *Streptomyces* sp, Firmicutes: Bacilli, *Bacillus* sp y *Lactobacillus* sp (Laboratorio de suelos y foliares, CORBANA S.A.). La plantación fue de *Musa* AAA Cavendish cv. Gran Enano (Simmonds y Shepherd, 1955), el sitio experimental fue sembrado la semana 24 del año 2013, por lo que tenía una edad aproximada de 7 años, en la octava generación, con una tasa de retorno de 1,3 frutas al año, además los datos proporcionados por la estación climática de la bananera hasta el mes de noviembre del 2018 indican una precipitación mensual promedio de 325 mm y una temperatura mensual promedio de 25,3 °. Los tratamientos dentro del experimento fueron implementados en el área del ensayo desde el mes de agosto del 2016.

Las mediciones se empezaron a realizar desde el mes de mayo, hasta el mes de octubre del año 2019,

### **3.2. Tratamientos y diseño experimental:**

La investigación constó de cuatro tratamientos:

T<sub>1</sub>= Testigo absoluto con libre crecimiento de las coberturas.

T<sub>2</sub>= Control químico de las coberturas con paraquat.

T<sub>3</sub>= Control mecánico de las coberturas (chapia) cada 22 días.

T<sub>4</sub>= Control mecánico de las coberturas (chapia) cada 22 días + biofertilizante (MM activado) 200 cc / planta.

Para el testigo absoluto libre crecimiento, se realizó un control mecánico a una altura aproximada de 50 cm, para evitar que el desarrollo descontrolado de las coberturas albergara serpientes, lo cual significaría un peligro para las personas que laboraban en el área de estudio. En cuanto al producto utilizado como biofertilizante, ha sido seleccionado dentro de muchos experimentos realizados por la Dirección de Investigaciones de CORBANA S.A, y ha sido determinado como un complemento al manejo de sistemas de coberturas, al mejorar características químicas, físicas y biológicas de los suelos en el cultivo de banano (Ortega, 2013).

Con 5 repeticiones por tratamiento, distribuidos como un arreglo de bloques irrestrictos al azar, (Figura 1):



**Figura 1.** Distribución de las repeticiones de cada tratamiento y el testigo en el área de estudio.

### **3.3. Variables evaluadas.**

Las variables evaluadas fueron resistencia a la penetración, densidad aparente, textura, temperatura del suelo, aporte de materia seca, materia orgánica, pH, fertilidad, biomasa microbiana, erosión, respiración de suelo y diversidad de microartrópodos.

#### **3.3.1. Inventario de las especies de plantas presentes (coberturas).**

Se realizó un inventario por familia, género y especie de las plantas encontradas dentro de los distintos tratamientos. Para esto se utilizó un marco de 1 m<sup>2</sup>, dividido en 100 cuadros, donde cada cuadro representaba el 1% de cobertura. Se realizaron 10 muestreos por repetición al inicio y al final del tiempo establecido para la recolección de datos, con el objetivo de identificar si existió un cambio en la distribución de las plantas identificadas dentro de los distintos sistemas de cobertura evaluados.

### 3.3.2. Variables físicas:

#### 3.3.2.1. Resistencia a la penetración:

Se realizaron 10 puntos de muestreo aleatorios por unidad experimental a 60 cm de profundidad. Se utilizaron los estándares propuestos en el manual Eijkelkamp (2013), con el instrumento Penetrologger ML3 versión 6,08 (penetrómetro digital) (Figura 2) de Royal Eijkelkamp Company. Este instrumento mide en unidades de Mega Pascales (Mpa), empleando un cono de 2 cm<sup>2</sup> con un ángulo de 60°, hasta alcanzar una profundidad de 60 cm.



**Figura 2.** Instrumento Penetrologger ML3 versión 6,08 utilizado para medir resistencia a la penetración.

### 3.3.2.2. *Densidad aparente:*

Se realizaron 10 puntos de muestreo aleatorio por unidad experimental a 10 cm de profundidad. Se introdujeron cilindros de metal de un volumen aproximado de 150 cm<sup>3</sup> con la ayuda de un “Martinelli” en cada horizonte, se taparon con cobertores plásticos y se trasladaron al laboratorio de suelos y foliares del Centro de Investigaciones de CORBANA S.A, (Figura 3). En el laboratorio se secaron en el horno de suelos a 105 °C por 24 horas. Se dejaron enfriar y se pesaron. La densidad aparente es la relación del peso del suelo seco/volumen conocido del cilindro en g cm<sup>-3</sup> (Forsythe, 1985).



**Figura 3.** Instrumento “Martinelli”, utilizado para extraer los cilindros con las muestras.

### **3.3.2.3. *Temperatura del suelo:***

Se realizaron cinco puntos aleatorios de muestreo por unidad experimental a 10 cm de profundidad, semanalmente durante cuatro meses, los días lluviosos no se tomaron mediciones ya que el agua acumulada en el perfil distorsiona los datos. La temperatura del suelo es una variable muy sensible, al elevarse las raíces del banano sufren estrés y problemas de absorción de nutrientes, por lo que es un indicador de salud del suelo muy importante.

Las mediciones se realizaron con un termómetro para suelo SOILTEST, graduado en °C.

### **3.3.2.4. *Erosión Hídrica:***

Se construyó una trampa por tratamiento, de 1 x 1,4 m, estas dimensiones están adaptadas al espacio libre dentro de una plantación de banano, para evitar que las hojas sean un obstáculo para la lluvia. Las trampas consisten en cajones de un área conocida (aproximadamente 1m<sup>2</sup>), los cuales están divididos con el terreno circundante de manera que el suelo que se erosione afuera de dicha trampa no entre en contacto con el de adentro y distorsione los datos. Uno de los cuatro bordes estará abierto y tuvo un medio donde se depositaron los sedimentos y el agua que caía en la trampa, y de esta manera se midió tanto el agua de escorrentía, como el suelo erosionado. En este experimento, los bordes fueron divididos con plástico negro, a una profundidad de 25 cm y a una altura de 20 cm sobre el suelo, esto con el objetivo de disminuir los escurrimientos. El sedimento proveniente de la parcela se depositó en una canoa de PVC, con salida hacia un recipiente de 20 litros que está colocado en el suelo, y tapado para que el agua fuera del área experimental no distorsionara los datos. (Figura 4). Esta metodología es una adaptación para el cultivo de banano, ya que las trampas de escorrentía utilizadas por Vallejos y Velázquez, (1998) estaban adaptadas al cultivo de café, con una densidad de siembra y conformación del dosel distinta al banano, y con pendientes elevadas.

El monitoreo se llevó a cabo una vez a la semana durante dos meses, para los cuales se pesaron los sedimentos en el campo y se llevaron al laboratorio de suelos y foliares del Centro de Investigaciones de CORBANA S.A, dónde se tomó el peso en

húmedo y luego fueron llevados a estufas durante 24 horas a 105 °C, para determinar el peso seco. Según el volumen de suelo correspondiente, fue convertido a toneladas por hectárea con la siguiente fórmula:

$$\frac{x \text{ g}}{y \text{ m}^2} \times \frac{z \text{ Kg}}{x \text{ g}} \times \frac{m \text{ Ton}}{z \text{ Kg}} \times \frac{y \text{ m}^2}{n \text{ ha}} = \text{Ton ha}^{-1}$$



**Figura 4.** Trampas para medir escorrentía y erosión del suelo, en este caso la canoa es el recolector de la trampa.

#### 3.3.2.5. *Textura:*

Se realizaron 10 puntos de muestreo aleatorio por unidad experimental a 10 cm de profundidad, se tomó una muestra de aproximadamente 500 gramos.

Se utilizó el método de Bouyoucos (Figura 5) sugerido por Henríquez y Cabalceta (2012), el cual consistió en pesar 40 gramos de la muestra tomada en el campo, se secó en el horno del laboratorio de suelos y foliares del Centro de Investigaciones de CORBANA S.A, a 110 °C por 24 horas, se tamizó en malla de 2 mm, se colocó la muestra en una botella de agitación, se agregaron 200 ml de agua y 10 ml de solución dispersante (37,5 g de hexametáfosfato de sodio y 7,14 g de carbonato de sodio en 1L) y se licuó en un vaso de licuadora para suelos. Se trasvasó a un cilindro de sedimentación y se aforó

con un hidrómetro dentro del cilindro, se sacó el hidrómetro, se tapó el cilindro y se agitó vigorosamente por 30 segundos, se agregaron dos gotas de alcohol amílico en los casos donde hubo formación de espuma. Pasados 40 segundos se tomó la primera medición con el hidrómetro y el termómetro. A las dos horas se realizó nuevamente la segunda medición. A los datos se le realizaron las siguientes correcciones: por cada grado centígrado arriba de 19,4 °C se agregó 0,3 a la lectura de hidrómetro y por cada grado centígrado debajo de 19,4 °C se restó 0,3 a la lectura del hidrómetro.

Por demostraciones experimentales, las arenas se depositan a los 40 segundos de iniciado el proceso de sedimentación, en tanto que los limos lo hacen en un período no menor de dos horas. Lo que queda en suspensión luego de ese tiempo corresponde al componente coloidal o de arcillas.

Las fórmulas necesarias para calcular los porcentajes relativos de arenas, limos y arcillas son los siguientes:

$\% \text{ de material en suspensión} = (\text{Lectura corregida } 40'' \times 100 / \text{peso muestra})$

$\% \text{ arenas totales} = 100 - \text{material en suspensión } 40''$

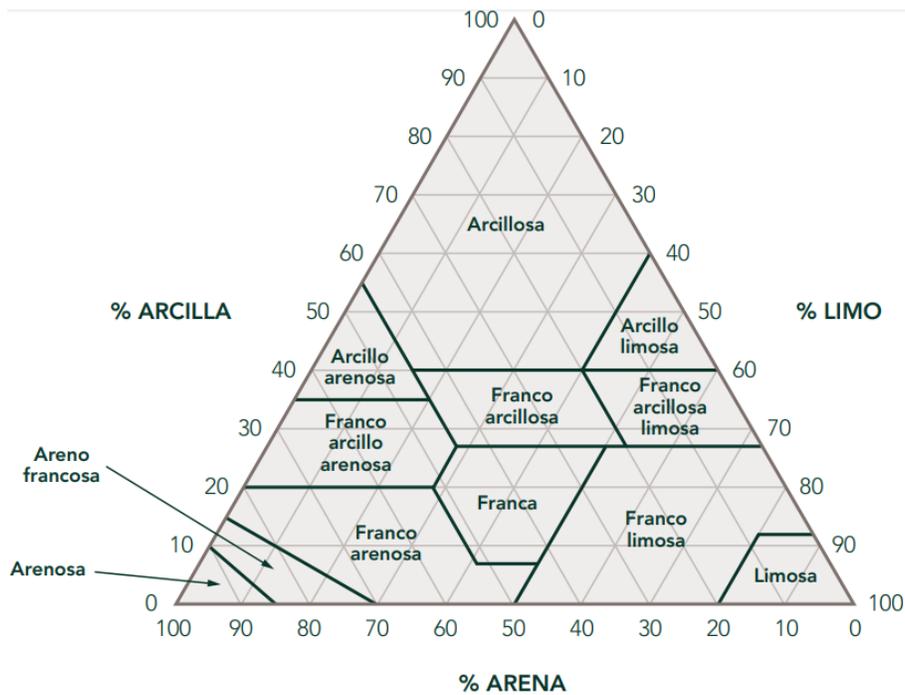
$\% \text{ arcillas totales} = (\text{Lectura corregida dos horas} \times 100) / \text{peso muestra}$

$\% \text{ limos totales} = 100 - (\% \text{ arenas} + \% \text{ arcillas})$

El siguiente paso fue determinar los contenidos porcentuales de los componentes arenas, limos y arcillas, determinar el nombre textural, lo cual se hizo con ayuda del “triángulo de texturas” (Figura 6). Para eso se tomó cada uno de los porcentajes y se refirieron a su correspondiente lado en el triángulo; el punto donde interceptaron las líneas correspondió al nombre textural.



**Figura 5.** Instrumentos utilizados para realizar el método de Bouyoucos.



**Figura 6.** Triángulo de texturas. (Fuente: U.S.D.A., 1977)

### 3.3.3. Variables químicas:

#### 3.3.3.1. Aporte de materia seca:

Se procedió a cortar todo el material vegetativo (coberturas) dentro de un área de 1m<sup>2</sup> en 5 puntos de muestreo aleatorios por unidad experimental, con tal de medir la cantidad de biomasa y nutrientes que vuelven al sistema, una vez que se realiza el control mecánico, y poder comparar contra el tratamiento en el cual se realiza control químico (Figura 7).



**Figura 7.** Marco de 1 m<sup>2</sup> utilizado para limitar la muestra de material vegetativo.

El aporte de materia seca (ms) de las coberturas se estimó mediante las siguientes fórmulas:

Kg/ms/ha =

$$\frac{g \frac{ms}{m^2} * 10000 \frac{m^2}{ha}}{1000 \frac{g}{kg}}$$

kg/ms/ha/año = kg ms/ha\*(número de ciclos de control al año)

El material vegetativo fue llevado al Laboratorio de Suelos y Foliar de CORBANA S.A, de acuerdo con el protocolo de manipulación de muestras CORBANA (2014) se pesaron en húmedo, se empacaron e identificaron en bolsas de papel para secarlas por 72 horas en un horno a 70-75°C y obtener el peso seco, una vez obtenido el peso seco de cada una de las muestras se extrajeron aproximadamente 200 g material para el análisis químico foliar en el Laboratorio de Suelos y Foliar de la Corporación Bananera Nacional (CORBANA S.A) en la Rita de Pococí, en donde se utilizó el método de Kalra (1998). Obteniendo así el contenido nutricional que aportarían dichas plantas al sistema productivo.

Los nutrientes que aportan las coberturas al suelo, luego de un ciclo de control, se obtuvo al relacionar el porcentaje de cada uno de los macroelementos C, N, P, K, Ca, Mg y S y las partes por millón (mg/kg) de los microelementos, por la materia seca (g/m<sup>2</sup>) en el análisis químico foliar, multiplicado por los ciclos de control al año, utilizando las siguientes formulas:

**Absorción de macroelementos de las coberturas**

$$g \text{ elemento}/m^2 = g \text{ ms} * (\% \text{ elemento (análisis de suelo)}) / 100$$

$$kg \text{ elemento}/ha = kg \text{ ms}/ha * (\% \text{ elemento (análisis de suelo)}) / 100$$

$$kg \text{ elemento}/ha/año = kg \text{ ms}/ha/año * (\% \text{ elemento (análisis de suelo)}) / 100$$

**Absorción de microelementos de las coberturas**

$$g \text{ elemento}/m^2 = ((mg \text{ elemento}/kg \text{ ms}) * (kg \text{ ms}/m^2)) / 1000$$

$$kg \text{ elemento}/ha = (g \text{ elemento}/m^2 * 10000) / 1000$$

$$kg \text{ elemento}/ha/año = kg \text{ elemento}/ha * \text{ciclos}/año$$

### **3.3.3.2. *Materia Orgánica:***

Se realizaron 10 puntos de muestreo aleatorio por unidad experimental a 10 cm de profundidad, tomando una muestra de aproximadamente 500 gramos.

Se determinó mediante la metodología de determinación de materia orgánica por digestión seca según Dumas (FAO, 2019) en el laboratorio de suelos y foliares del Centro de Investigaciones de CORBANA S.A.

### **3.3.3.3. *pH:***

Se realizaron 10 puntos de muestreo aleatorio por unidad experimental a 10 cm de profundidad, ya que es la profundidad donde hay mayor probabilidad de encontrar una variación causada por el efecto de las coberturas.

La muestra de suelo se secó en las estufas del laboratorio de suelos y foliares del Centro de Investigaciones de CORBANA S.A, a 45 °C hasta alcanzar un peso constante, por lo que la duración del proceso dependió de la humedad de la muestra. Posteriormente se molió y se tamizó utilizando una malla que permite un tamaño de partícula máximo de 2 mm. Con una cuchara se colocaron 10 ml de suelo en la bandeja extractora y se le agregaron 25 ml de agua desionizada. Se revolvió con un agitador oscilatorio durante cinco minutos a 100 ciclos por minuto. Se dejó descansar por 20 minutos, hasta que el suelo sedimentó y poder tomar lectura del líquido sobrenadante. Se agitó brevemente y se leyó el pH (Díaz-Romeu y Hunter, 1978).

### **3.3.3.4. *Fertilidad (Ca, Mg, K, P, Fe, Cu, Zn, Mn y B):***

Se colectaron 10 muestras por unidad experimental, extrayéndolas a una profundidad de 10 cm.

La muestra de suelo se secó en las estufas del laboratorio de suelos y foliares del Centro de Investigaciones de CORBANA S.A, a 45 °C hasta alcanzar un peso constante, por lo que la duración del proceso dependió de la humedad de la muestra. Posteriormente se molió y se tamizó utilizando una malla que permite un tamaño de partícula máximo de 2 mm. Se colocaron 2.5 ml de suelo en uno de los recipientes de la bandeja de extracción.

Posteriormente se agregaron 25 ml de la solución Mehlich 3, se agitó por cinco minutos y se filtró. Al filtrado sin diluir se le determinaron los elementos deseados en un equipo de plasma modelo Optima 7300. Este protocolo, además de darnos la información de todos los elementos aquí mencionados, nos permite calcular las relaciones Ca/Mg, Ca/K, Mg/K y % de saturación de Ca (Mehlich, 1984).

### **3.3.4. Variables biológicas:**

#### **3.3.4.1. Biomasa microbiana del suelo:**

Se realizaron 3 puntos de muestreo aleatorio a 10 cm de profundidad por unidad experimental, una única vez durante todo el experimento en el mes de octubre del 2019, tomando una muestra de aproximadamente 500 gramos.

Se cuantificó mediante la técnica de fumigación-extracción según Vance *et al.*, (1987), en el Laboratorio de Microbiología Agrícola del Centro de Investigaciones Agronómicas de la UCR.

#### **3.3.4.2. Respiración del suelo:**

Se realizaron 3 puntos aleatorios de muestreo por unidad experimental, una única vez durante todo el experimento en el mes de octubre del 2019. De acuerdo con las especificaciones del manual ADC Bio-Scientific Ltd (2015), empleando un analizador automático de fotosíntesis LiCOR SD, al cual se le adaptó el instrumento Soil Respiration Chamber Hood V2. (Figura 8)

La campana para determinar la salida de gas del suelo se coloca en la superficie, no tiene que penetrar ninguna capa del suelo, y se espera hasta que el analizador determine mediante una señal que se tomó el dato (Sánchez, 2018).

El dato que brindó el equipo es la diferencia del flujo molar neto de CO<sub>2</sub> dentro y fuera del suelo, destacado con el símbolo  $C_e$ , el cual se mide en ( $\mu \text{ mol s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ ).

$$C_e = u (-\Delta c)$$

Dónde:  $u$  flujo de aire molar en  $\text{mol s}^{-1}$

$\Delta c$  diferencia en la concentración de  $\text{CO}_2$  a través de la campana de suelo, dilución corregida,  $\mu\text{mol mol}^{-1}$  (ADC Bio-Scientific Ltd, 2015).



**Figura 8.** Detalle del instrumento Soil Respiration Chamber, adaptado al LCI-SD que se utilizó para medir la respiración del suelo.

#### 3.3.4.3. *Diversidad de microartrópodos del suelo:*

Se colectó una muestra aleatoria por unidad experimental, a 10 cm de profundidad de aproximadamente un kilogramo, una única vez durante todo el experimento, ya que sólo se contaban con seis meses para la recolección de datos y el proceso de identificación y clasificación puede ser muy largo.

Se siguió la metodología utilizada por Guillén *et al.*, (2006), se colocó la muestra en embudos de Berlesse-Tulberg (Figura 9) por seis días. Los especímenes se

recolectaron en alcohol de 75% y posteriormente se separó la microfauna de la meso y macrofauna atrapados en cada muestra, ya que estos organismos no eran del interés de esta variable.

Para la identificación del material se utilizó literatura especializada Doreste (1984), Vázquez y Palacios-Vargas (2004), Eisenbeis y Wichard (1987). Los especímenes se clasificaron a nivel de familia, una vez identificadas se determinaron los índices de diversidad de Shannon-Wiener (Shannon y Weaver, 1949) para cada tratamiento, así como, el número de individuos de cada muestra.



**Figura 9.** Embudos de Berlesse-Tulberg, utilizados para recolectar los microartrópodos de las muestras.

### **3.4. Análisis estadístico:**

El análisis de los datos se realizó en el software estadístico RStudio Version (1,0,153), y para el análisis exploratorio, todos los datos evaluados se sometieron a una prueba de distribución de datos, con el fin de determinar el cumplimiento de los supuestos estadísticos de normalidad, homocedasticidad e independencia de las varianzas. Seguidamente se realizó un análisis de varianza, y una prueba de diferencias mínimas significativas por el método Tukey al 5% de probabilidad de cometer el error Tipo I. A todos los datos se les sometió a un análisis de componentes principales, por medio del

paquete estadístico FactoMiner (Lê *et al*, 2008), exceptuando la variable de aporte de materia seca ya que sólo se consideraron dos de los cuatro tratamientos.

## 4. RESULTADOS.

### 4.1. Inventario de coberturas:

Una vez realizado el inventario de coberturas para los tratamientos de control mecánico y control mecánico + biol, se encontraron ocho especies dominantes en cada sistema (Cuadro 1). La especie dominante en el control mecánico fue *Commelina erecta*, mientras que para el tratamiento control mecánico + biol la principal especie encontrada fue *Geophila macropoda*. Por otra parte, para ambos tratamientos la especie *Cyperus laxus* fue la menos dominante (Cuadro 1).

Se puede observar que en la mayoría de las especies el porcentaje de cobertura varió entre tratamientos, no así, para *Panicum polygonatum* donde los porcentajes de cobertura entre tratamientos fueron muy similares. Además, la cobertura *Geophila macropoda* es mayormente dominante en ambos sistemas.

**Cuadro 1.** Levantamiento de coberturas de los tratamientos control mecánico y control mecánico + biol.

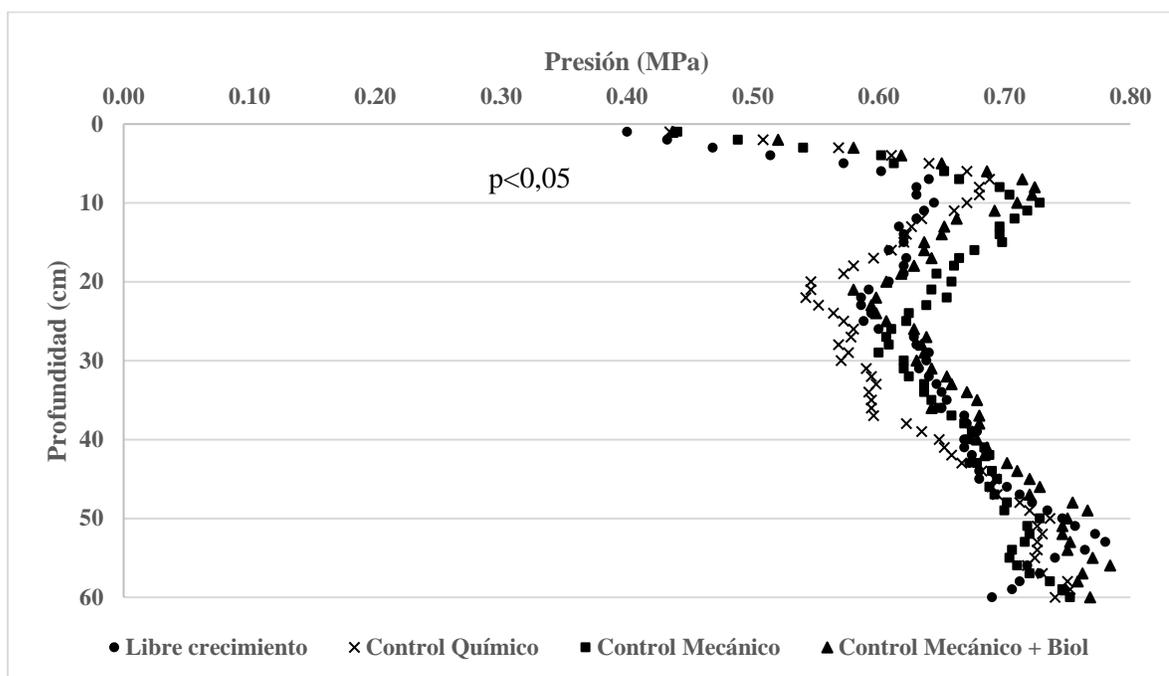
Tratamiento	% de cobertura							
	<i>Geophila macropoda</i>	<i>Panicum polygonatum</i>	<i>Commelina erecta</i>	<i>Digitaria sanguinalis</i>	<i>Ishchaemum ciliare</i>	<i>Cyperus laxus</i>	<i>Oplismenus burmannii</i>	<i>Paspalum conjugatum</i>
Control mecánico	6,84	3,52	7,64	2,16	2,88	2,04	4,4	2,6
Control mecánico+biol	7,8	3,48	2,72	3,56	4,12	0,48	2,8	3,28

### 4.2. Variables físicas:

#### 4.2.1. Resistencia a la penetración.

Se encontró una resistencia a la penetración significativamente mayor de todos los tratamientos con respecto al testigo hasta los primeros 16 cm de profundidad ( $p < 0,05$ ) (Figura 10). A partir de esta profundidad existe un viraje donde el tratamiento de control

químico posee la menor resistencia a la penetración hasta los 44 cm ( $p < 0,05$ ). Además, se puede observar un comportamiento similar de todos los tratamientos y el testigo, dónde aumenta la resistencia a la penetración de los 0-10 cm, luego disminuyen hasta los 20 cm y nuevamente aumenta hasta los 50 cm de profundidad.



**Figura 10.** Resistencia a la penetración del suelo (Mpa), de los tratamientos y el testigo (libre crecimiento) hasta 60 cm de profundidad.

#### 4.2.2. Densidad aparente.

Para esta variable no se encontraron diferencias significativas entre los distintos tratamientos y el testigo (libre crecimiento), ya que sus valores fueron prácticamente los mismos (Cuadro 2).

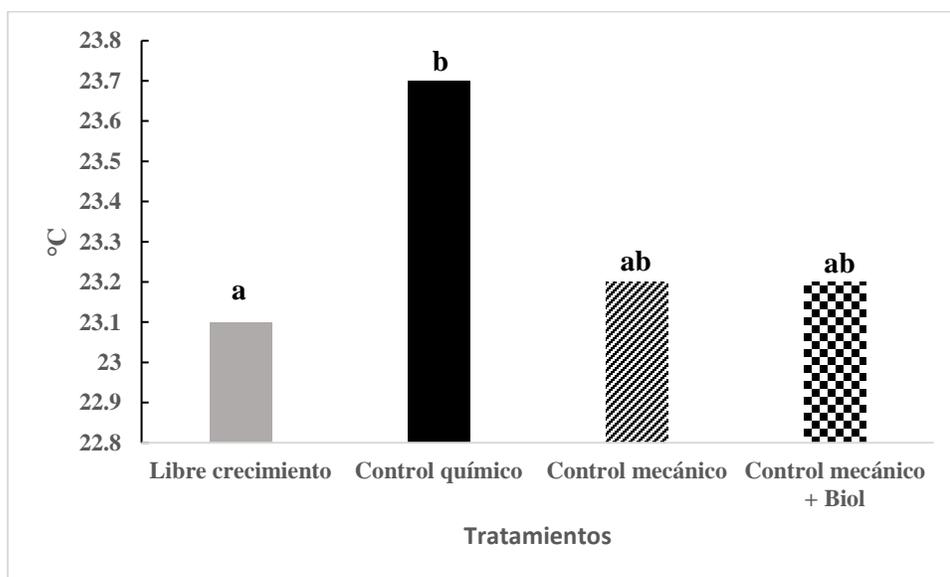
**Cuadro 2.** Densidad aparente del suelo en los distintos tratamientos y el testigo (Libre crecimiento).

Tratamiento	Densidad aparente
	g/mL
Libre crecimiento	1,00a
Control químico	1,03a
Control mecánico	1,01a
Control mecánico + chapia	1,03a

\*Tratamientos con una letra en común no son significativamente diferentes, según prueba de Tukey ( $p < 0,05$ )

#### 4.2.3. *Temperatura del suelo.*

A partir de las cuatro evaluaciones realizadas desde julio hasta octubre del 2019, se encontró que el tratamiento de control químico obtuvo una temperatura del suelo significativamente mayor al testigo (Figura 11).

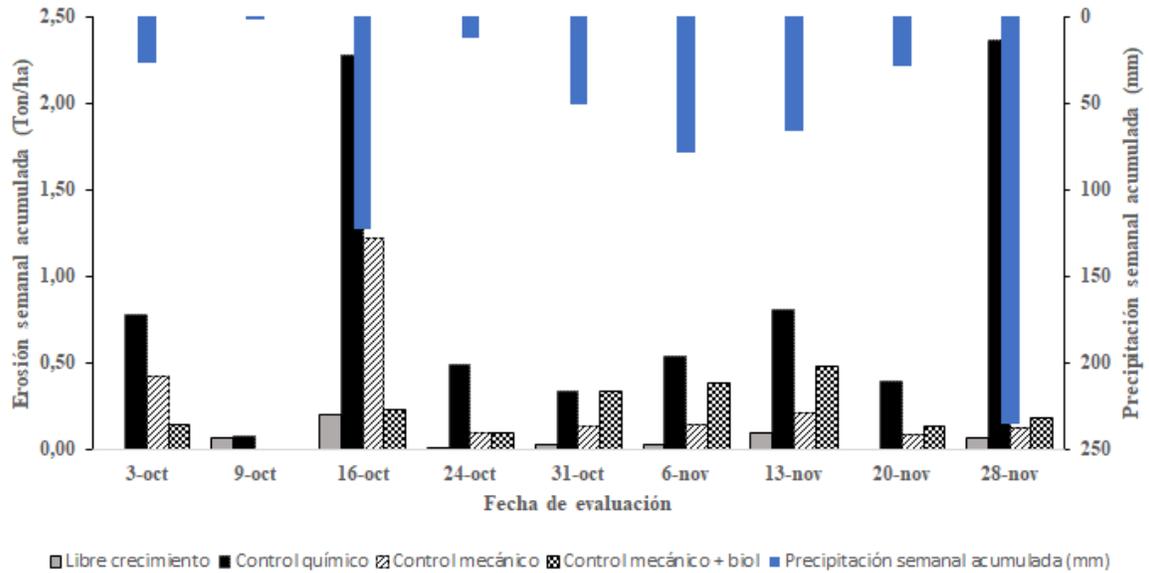


**Figura 11.** Temperatura promedio del suelo de los distintos tratamientos y el testigo (libre crecimiento), para cuatro fechas de evaluación.

\*Tratamientos con una letra en común no son significativamente diferentes, según prueba de Tukey ( $p < 0,05$ )

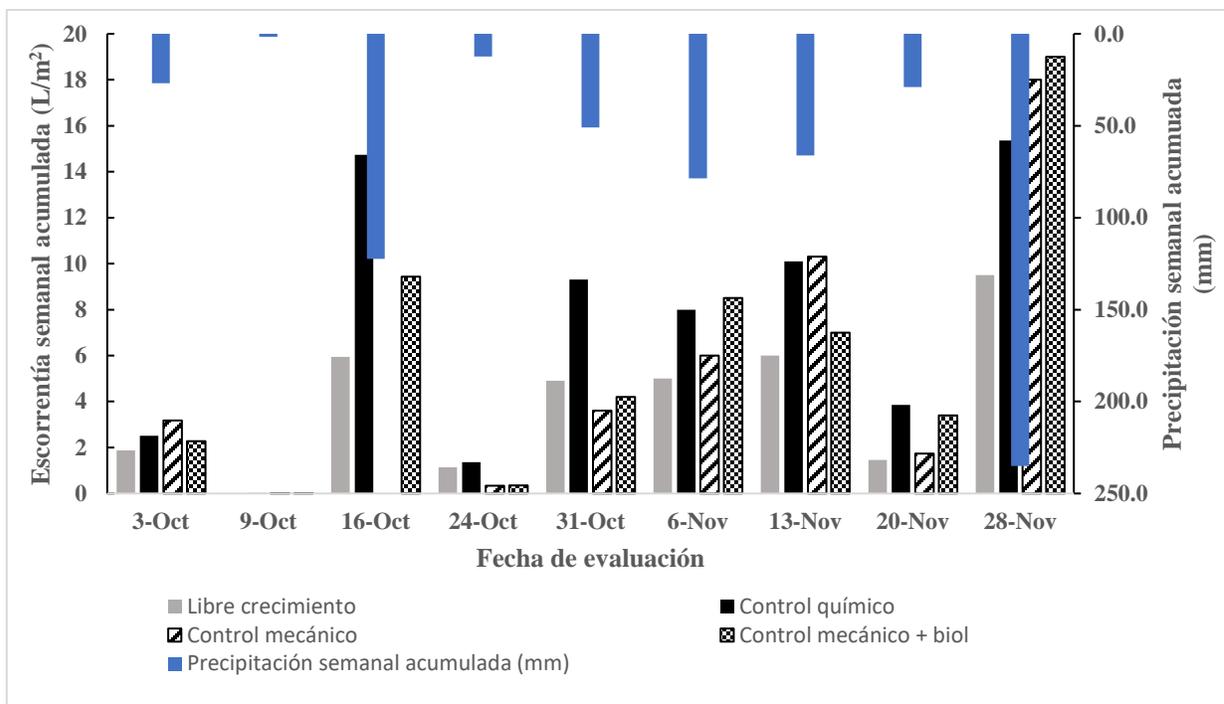
#### 4.2.4. Erosión hídrica.

Se determinó una tendencia de mayor erosión semanal acumulada por parte del tratamiento de control químico con respecto al testigo y estadísticamente diferenciados mediante un análisis de diferencias mínimas significativas ( $p < 0.05$ ), además la tasa de erosión es proporcional a la precipitación semanal acumulada (Figura 12).



**Figura 12.** Erosión semanal acumulada para los distintos tratamientos y el testigo (libre crecimiento), en nueve fechas de evaluación.

La escorrentía semanal acumulada fue similar en todos los tratamientos, de acuerdo con el análisis de diferencias mínimas significativas. La precipitación semanal acumulada no tuvo un comportamiento proporcional a la cantidad de escorrentía semanal acumulada en todos los tratamientos y el testigo durante las nueve fechas de evaluación (Figura 13).



**Figura 13.** Escorrentía semanal acumulada para los distintos tratamientos y el testigo (libre crecimiento), en nueve fechas de evaluación.

#### 4.2.5. *Textura.*

Con respecto al comportamiento de la textura del suelo en los distintos tratamientos y el testigo (libre crecimiento), se puede apreciar que los porcentajes de arena y arcilla no varían significativamente entre los tratamientos y con respecto al testigo (Cuadro 3), sin embargo, los porcentajes de limo del tratamiento de control químico y el testigo (libre crecimiento), fueron significativamente mayores a los tratamientos de control mecánico y control mecánico + biol.

**Cuadro 3.** Porcentajes de arena, limo y arcilla de los distintos tratamientos y el testigo (libre crecimiento).

Tratamientos	Fracción (%)		
	Arena	Limo	Arcilla
Libre crecimiento	55,4a	31,7b	13,2a
Control químico	56,1a	30,9b	13,2a
Control mecánico	59,1a	28,1a	12,8a
Control mecánico+biol	61a	27,2a	12,2a

\*Tratamientos con una letra en común no son significativamente diferentes, según prueba de Tukey ( $p<0,05$ )

### 4.3. Variables químicas:

#### 4.3.1. Aporte de materia seca.

No se determinaron diferencias significativas entre tratamientos en el aporte de materia seca, nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio y azufre (Cuadro 4).

**Cuadro 4.** Cantidad de materia seca, Nitrógeno, Fósforo, Potasio, Calcio, Magnesio y Azufre, acumulados en las coberturas de los tratamientos de control mecánico y control mecánico + biol.

Tratamiento	ms	N	P	K	Ca	Mg	S
Kg/ha/año							
<b>Control</b>							
<b>mecánico</b>	1211a	43,11a	3,73a	38,27a	11,47a	4,98a	5,59a
<b>Control</b>							
<b>mecánico +</b>							
<b>biol</b>	976a	33,28a	3,03a	32,60a	8,71a	4,20a	4,95a

\*Tratamientos con una letra en común no son significativamente diferentes, según prueba de Tukey ( $p<0,05$ )

#### 4.3.2. *Materia orgánica.*

Los porcentajes de materia orgánica de los distintos tratamientos y el testigo (libre crecimiento) no difirieron significativamente entre estos (Cuadro 5), además, todos se encontraron dentro del rango recomendado para el cultivo de banano, por parte de CORBANA S.A.

**Cuadro 5.** Porcentaje de materia orgánica de los distintos tratamientos y el testigo (libre crecimiento).

<b>Tratamiento</b>	<b>MO*</b>
	%
Valor crítico	2 a 4
Libre crecimiento	3,46a
Control químico	3,32a
Control mecánico	3,58a
Control mecánico + biol	3,18a

\*Tratamientos con una letra en común no son significativamente diferentes, según prueba de Tukey ( $p < 0,05$ )

#### 4.3.3. *pH.*

Los valores de pH de los distintos tratamientos y el testigo (libre crecimiento), no variaron estadísticamente (Cuadro 6). Además, todos los tratamientos y el testigo se encontraron por debajo del rango recomendado para el cultivo de banano por parte CORBANA S.A.

**Cuadro 6.** Valor de pH de los distintos tratamientos y el testigo (libre crecimiento).

<b>Tratamiento</b>	<b>pH</b>
Valor crítico	5,5 a 6,5
Libre crecimiento	5,37a
Control químico	5,28a
Control mecánico	5,38a
Control mecánico + biol	5,41a

\*Tratamientos con una letra en común no son significativamente diferentes, según prueba de Tukey ( $<>0,05$ )

#### **4.3.4. Fertilidad (Ca, Mg, K, P, Fe, Cu, Zn, Mn y B).**

Para esta variable no se encontraron diferencias significativas en los distintos tratamientos y el testigo (libre crecimiento) (Cuadro 7), sin embargo, se puede apreciar que excepto el testigo, los tres tratamientos poseen valores de Calcio dentro de los rangos recomendados para el cultivo de banano por CORBANA S.A; también, para el elemento Magnesio todos los tratamientos y el testigo se encuentran dentro de los rangos recomendados; asimismo, para el elemento Potasio todos los tratamientos y el testigo cuadruplican el valor máximo establecido para este elemento; en el caso del Fósforo todos los tratamientos y el testigo triplicaron el valor máximo establecido para este elemento; para el Hierro los tratamientos y el testigo casi duplican el valor máximo establecido para este elemento en el cultivo de banano; para el Cobre todos los tratamientos y el testigo superan el valor máximo establecido para este elemento en el cultivo de banano; en el caso del Zinc los tratamientos y el testigo superan seis veces el valor máximo; en el caso del Manganeso los tratamientos y el testigo superan más de ocho veces el valor máximo establecido, y finalmente en el caso del Boro solo los tratamientos de control químico y control mecánico + biol, se encuentran dentro del rango establecido para este elemento en el cultivo de banano por CORBANA S.A.

**Cuadro 7.** Valores de fertilidad del suelo en los distintos tratamientos y el testigo (libre crecimiento).

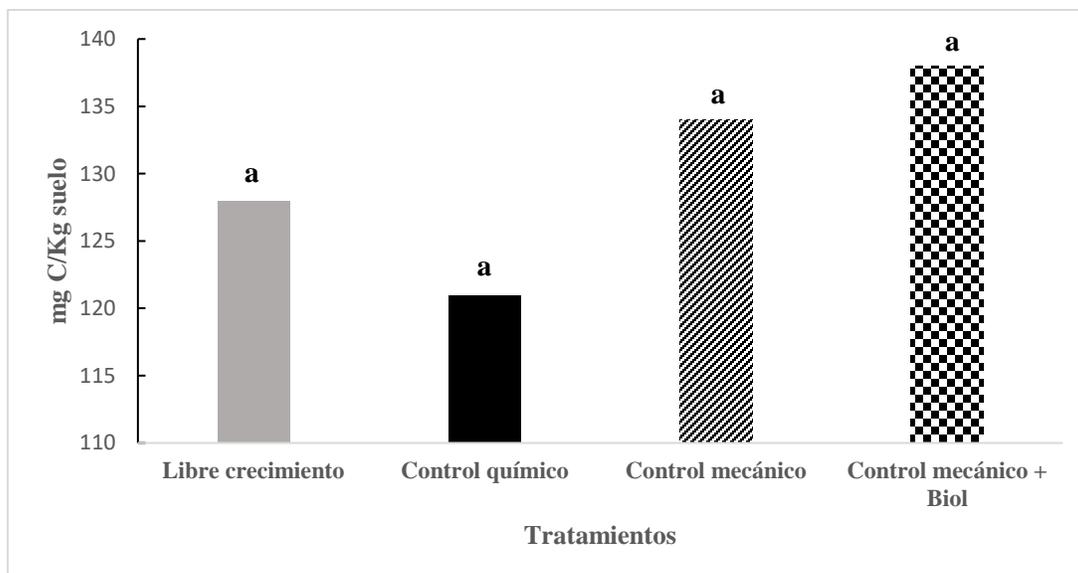
Tratamiento	Ca	Mg	K	P	Fe	Cu	Zn	Mn	B
	cmol(+)/L				mg/L				
Valor crítico	5,01 a 20	2,39 a 10	0,61 a 1	20,01 a 40	50 a 150	2,01 a 5	1,01 a 3	5,01 a 10	0,2 a 0,7
Libre crecimiento	20,3a	6,35a	4,54a	111a	270a	5,81a	19,5a	94,4a	0,905a
Control químico	19,0a	6,19a	4,17a	108a	270a	5,41a	18,3a	95,5a	0,667a
Control mecánico	19,7a	6,48a	4,56a	116a	265a	5,78a	17,8a	90,6a	0,809a
Control mecánico + biol	19,8a	6,48a	3,99a	106a	262a	5,52a	16,1a	82,2a	0,666a

\*Tratamientos con una letra en común no son significativamente diferentes, según prueba de Tukey ( $p < 0,05$ ).

#### 4.4. Variables biológicas:

##### 4.4.1. *Biomasa microbiana del suelo.*

En la variable de biomasa microbiana no existieron diferencias significativas entre los distintos tratamientos y el testigo (libre crecimiento) (Figura 14), sin embargo, existe una tendencia donde el tratamiento de control químico posee un menor contenido de biomasa microbiana tanto, comparando al testigo como a los tratamientos de control químico y control químico + biol.

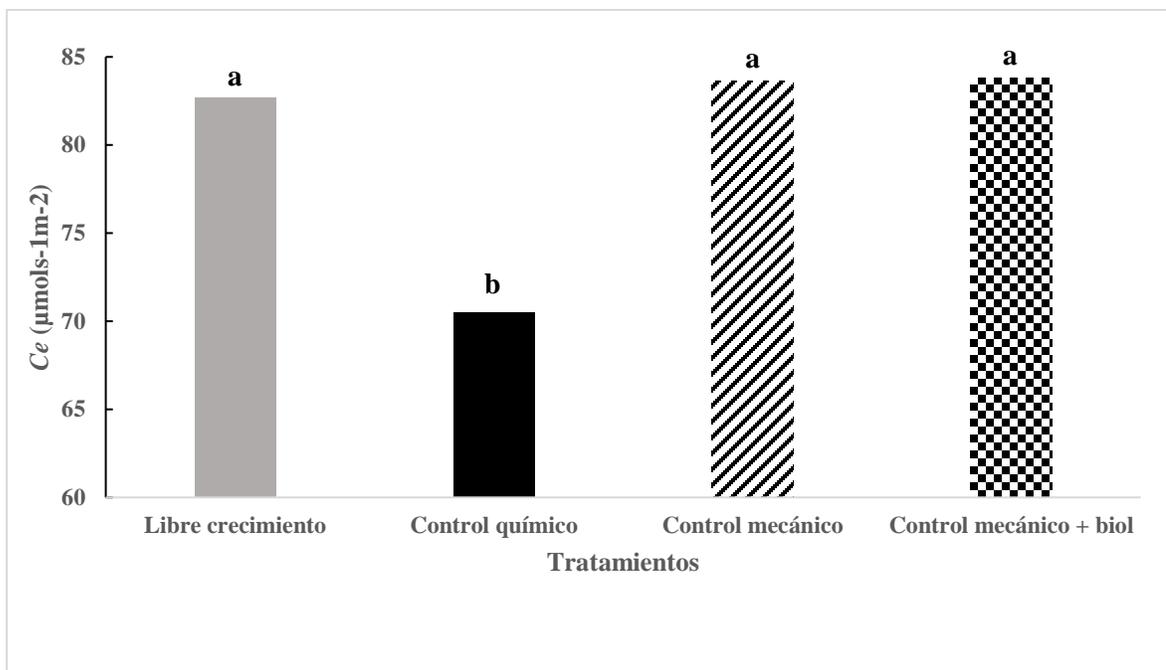


**Figura 14.** Biomasa microbiana del suelo medido (mg C/Kg de suelo), para los distintos tratamientos y el testigo (libre crecimiento).

\*Tratamientos con una letra en común no son significativamente diferentes, según prueba de Tukey ( $p < 0,05$ )

#### 4.4.2. *Respiración del suelo.*

En el tratamiento de control químico se determinó que la respiración del suelo fue significativamente menor, con respecto a los demás tratamientos y el testigo (Figura 15), con una diferencia de flujo molar mayor a  $10 \mu\text{mols}^{-1}\text{m}^{-2}$  de  $\text{CO}_2$ .



**Figura 15.** Respiración del suelo medido como flujo molar de CO<sub>2</sub> (μmols<sup>-1</sup>m<sup>-2</sup>), para los distintos tratamientos y el testigo (libre crecimiento.)

\*Tratamientos con una letra en común no son significativamente diferentes, según prueba de Tukey (p<0,05).

#### 4.4.3. *Diversidad de microartrópodos del suelo.*

Se encontró una mayor cantidad de individuos de la familia Isotomidae, en el tratamiento de control mecánico + biol, respecto a los demás tratamientos (p<0,05) (Cuadro 8). Es importante aclarar que por la literatura utilizada para la identificación algunas familias han cambiado de taxonomía actualmente, Eugamasidae ya no existe como familia, por lo tanto, pertenece a otra familia dentro del orden Mesostigmata que ha sido consultado a expertos y de los cuales no se obtuvo respuesta al finalizar esta Práctica Dirigida, asimismo, la familia Glycyphagidae ya no existe como tal e igualmente fue consultado a expertos en taxonomía, sin embargo, el objetivo de esta variable no es determinar con exactitud la taxonomía, sino más bien, identificar morfotipos para determinar si existe una diferencia entre tratamientos con respecto al testigo.

El tratamiento de control mecánico tuvo una abundancia relativa significativamente mayor al testigo (libre crecimiento) (Cuadro 9), sin embargo, al relacionar esta variable con la cantidad de individuos por familia, se determinó el índice

de diversidad de Shannon-Wiener, dónde no existieron diferencias significativas entre los distintos tratamientos y el testigo (Libre crecimiento).

**Cuadro 8.** Cantidad promedio de individuos recolectados de las familias más abundantes de microartrópodos identificados.

<b>Familias</b>	<b>Libre crecimiento</b>	<b>Control químico</b>	<b>Control mecánico</b>	<b>Control mecánico + Biol</b>
Entomobrydae	10,2a	19,4a	11 a	23a
Eugamasidae	4,5a	6,67a	5a	6,6a
Glycyphagidae	5,5a	2,75a	3a	1,5a
Isotomidae	2,5a	2,5a	1,5a	12b

\*Tratamientos con una letra en común no son significativamente diferentes ( $p>0,05$ )

**Cuadro 9.** Abundancia relativa e índice de diversidad de Shannon-Wiener para determinar la diversidad de familias de microartrópodos encontrados en los distintos tratamientos y el testigo (Libre crecimiento).

<b>Tratamiento</b>	<b>Abundancia relativa</b>	<b>H'</b>
<b>Libre crecimiento</b>	0,18a	2,08a
<b>Control químico</b>	0,2ab	1,76a
<b>Control mecánico</b>	0,31b	1,45a
<b>Control mecánico+biol</b>	0,22ab	1,59a

\*Tratamientos con una letra en común no son significativamente diferentes ( $p>0,05$ )

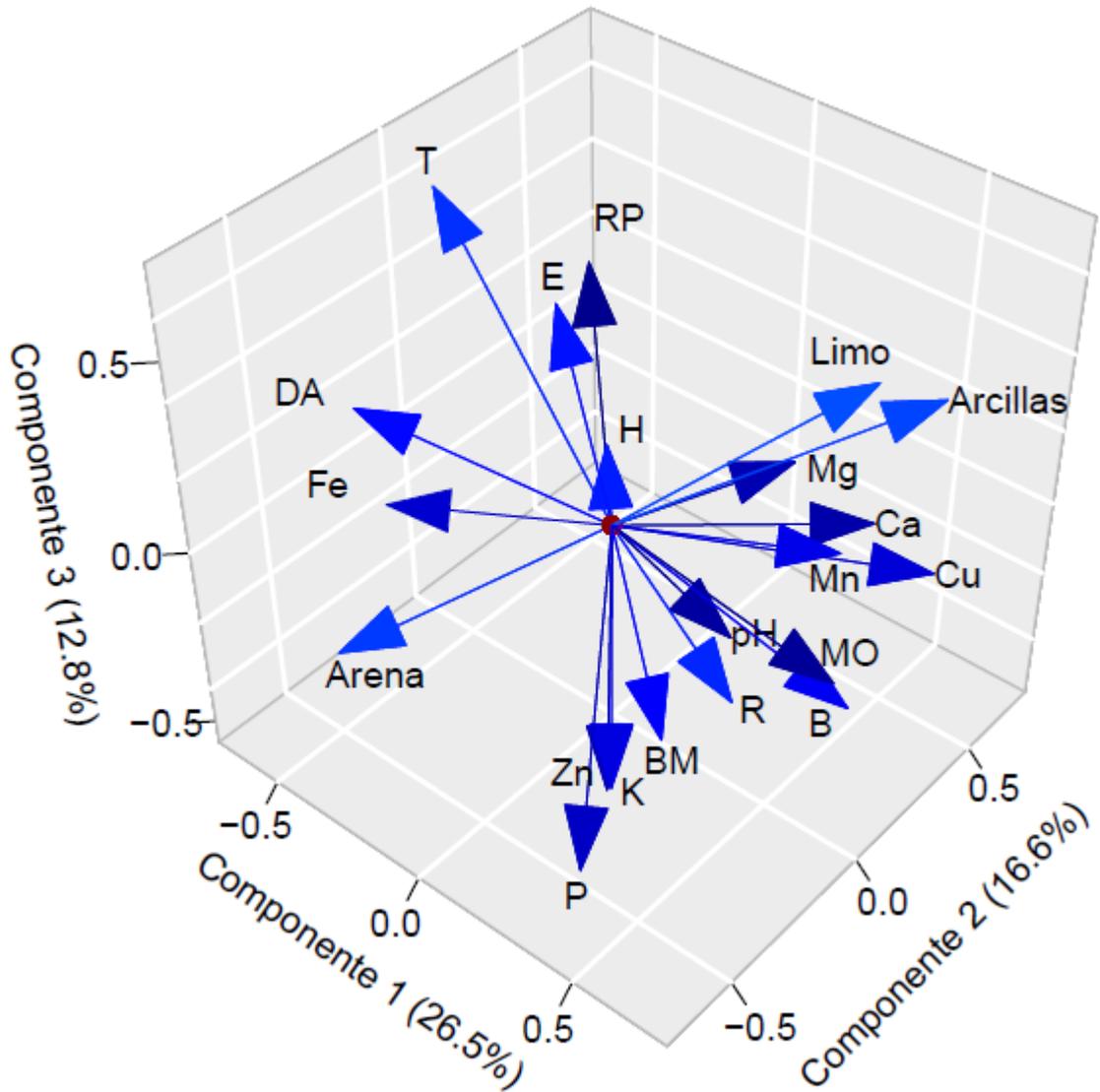
#### **4.5. Análisis multivariado de componentes principales.**

La distribución ortogonal del análisis multivariado de componentes principales realizado al conjunto de datos de la investigación (Figura 16), permitió cuantificar el efecto que los distintos sistemas de manejo presentan sobre las variables medidas. Los tres primeros componentes principales explican el 53,6% de la

variabilidad total, permitiendo la representación gráfica de todas las propiedades medidas en un mismo plano.

Cada variable medida está representada por un auto vector, definido por la correlación que existe entre la propiedad del suelo y la componente principal considerada (Cuadro 10). El ángulo existente entre los vectores representa el grado de correlación entre propiedades del suelo analizadas.

Las correlaciones obtenidas indican que el componente uno se relaciona con las variables que tienen influencia sobre la materia orgánica, la textura y estructura de los suelos, mientras el componente dos concentra las variables asociadas con la fertilidad del suelo. Finalmente, el componente tres fue la que incluyó el efecto de los tratamientos dentro de su variabilidad, y correlaciona mayormente con las variables biológicas del suelo, la erosión, el pH y la temperatura de suelo.



**Figura 16.** Distribución ortogonal del análisis de Componentes principales (ACP) de los parámetros analizados. Los componentes uno, dos y tres explican el 53,6% de la variabilidad total.

**Cuadro 10.** Auto vectores de las variables analizadas para los tres primeros componentes principales.

<b>Componente 1</b>		<b>Componente 2</b>		<b>Componente 3</b>	
<b>Variable</b>	<b>Correlación</b>	<b>Variable</b>	<b>Correlación</b>	<b>Variable</b>	<b>Correlación</b>
Materia orgánica	0,76	Calcio	0,74	pH	-0,60
Cobre	0,60	Potasio	-0,67	Erosión	0,45
Manganeso	0,66	Fósforo	-0,75	Respiración del suelo	-0,56
Boro	0,79	Zinc	-0,68	Temperatura del suelo	0,73
Densidad aparente	-0,68				
Arena	-0,72				
Arcillas	0,64				
Limo	0,66				

## 5. DISCUSIÓN.

### 5.1. Inventario de coberturas.

El promedio del inventario de coberturas muestran un comportamiento similar al realizado por Valverde *et al.*, (2018), dónde las coberturas dominantes fueron *Cyperus laxus*, *Digitaria sanguinalis*, *Geophila macropoda*, *Melothria pendula*, *Oplismenus burmannii* y *Panicuma polygonatum*, tanto para el tratamiento de control mecánico cómo para el de control mecánico + biol; Acosta y Agüero (2001) realizaron un levantamiento de malezas en la finca bananera San Pablo en tratamientos con manejo mecánico mensual, donde encontraron una población dominante compuesta por las especies: *Cyperus luzulae*, *Panicum polygonatum*, *Geophila macropoda* y *Paspalum conjugatum*. Asimismo, Araya (2017) realizó un levantamiento de malezas en la finca San Pablo donde encontró especies dominantes como *Panicum polygonatum*, *Geophila macropoda*, *Oplismenus burmannii*, *Paspalum conjugatum*, *Digitaria sanguinalis*, *Ischaemum ciliare* y *Cyperus laxus*; esto demuestra que la diversidad de especies de la finca y el experimento, han sido relativamente estables en el tiempo.

*Geophila macropoda* es una planta nativa en el sitio experimental, posee características que causan su adaptación al manejo con control mecánico (Cuadro 1), entre estas destacan su tolerancia al pisoteo, ya que en el cultivo de banano se realizan prácticas intensivas como la fertilización, deshije, embolsamiento, apuntalamiento y cosecha, el tránsito constante de trabajadores dentro de la plantación es la principal causa del bajo porcentaje de coberturas que se presentó en el experimento, además, *Geophila macropoda* es una planta de sombra, con porte rastrero, por lo que recibe una menor pérdida de biomasa en el control mecánico si la comparamos con Poáceas de porte erecto (Vargas-Castillo y Abdelnour-Esquivel, 2010).

Por su parte *Commelina erecta* es una planta que tiene la capacidad de producir raíces en sus nudos basales cuando el tallo tiene contacto con el suelo y esta característica le permite ser fácilmente distribuida cada vez que se realiza un control mecánico, esparciendo trozos de plantas por toda el área de cultivo, sin embargo, en el tratamiento de control mecánico esta planta fue establecida naturalmente en el área de estudio ya sea por el banco de semillas que existía o por vectores que llevaron las semillas hasta este lugar, mucho tiempo antes que en el tratamiento de control mecánico + biol (Cuadro 1), y de ahí su diferencia en el porcentaje de cobertura del área total (Nisensohn *et al.*, 2011)

## **5.2. Variables físicas.**

### **5.2.1. Resistencia a la penetración.**

La resistencia a la penetración encontrada en los primeros 10 cm del suelo (Figura 10), se debe al efecto directo de las coberturas, ya que en esta profundidad se encuentra el horizonte A<sub>p</sub>, el cual posee una estructura más determinada por el efecto de la interacción de las raíces de las coberturas y el contenido de materia orgánica. La menor resistencia a la penetración del tratamiento de libre crecimiento, coincide con lo encontrado por Sánchez (2018) en los primeros cinco centímetros de suelo en sistemas de coberturas en banano, al no existir control químico y mecánico, las poáceas logran dominar el sistema de coberturas por su mayor capacidad de competencia por luz y nutrientes (Acosta y Agüero, 2002), al crecer las raíces penetran capas más profundas del suelo, formando una mayor cantidad de macroporos que disminuyen la resistencia a la penetración de las capas superficiales del suelo; en el caso de los tratamientos con control mecánico y químico, donde el crecimiento de las coberturas es detenido por el corte de follaje o por la acción del herbicida, las raíces ven afectado su desarrollo y distribución en el perfil superior del suelo (Serrano *et al.*, 2010).

Los resultados obtenidos en el tratamiento de control mecánico+ biol en la variable de resistencia a la penetración, no coinciden con lo encontrado por Ortega (2013), donde los tratamientos con biofermento no variaron significativamente la resistencia a la penetración respecto al testigo sin aplicación de biofermentos.

La resistencia a la penetración de todos los tratamientos (Figura 10), disminuyó hasta los 20 cm de profundidad y luego aumentó hasta los 50 cm de profundidad, este comportamiento se debe a que ambos horizontes 10-20 cm y 20-50 cm son antropogénicos, enterrados cada vez que se prepara nuevamente el terreno para el cultivo y explican su comportamiento a esta variable por el manejo que tuvo el cultivo cuando ambos perfiles fueron los horizontes superiores del suelo (Zúñiga, 2020).

Aunque existe diferencias entre los tratamientos de control químico, control mecánico y control mecánico+biol con respecto al tratamiento de libre crecimiento

(Figura 10), todos los datos están por debajo de los límites encontrados en la literatura, Zerpa y Sosa, (2013), estimaron que una resistencia a la penetración menor o igual a 0,9 MPa no provoca una restricción para el desarrollo de la zona radicular; por su parte Forsythe y Tafur (1985);Forsythe (1997) establecieron límites en la resistencia a la penetración donde valores de 0 a 0,6 MPa se valora como excelente para el desarrollo de las raíces y de 0,7 a 1,2 MPa como un valor aceptable.

El análisis de componentes principales (Figura 16), indica que la variable de resistencia a la penetración no posee alta correlación con ninguno de los tres componentes principales del experimento.

### **5.2.2. Densidad aparente.**

No se encontró una variación significativa entre los tratamientos para la variable de densidad aparente (Cuadro 2), posiblemente este resultado es debido a que el experimento tiene menos de cuatro años de establecido. Varela *et al.*, (2011) no encontraron diferencias en la densidad aparente en soja y avena, con y sin cobertura en el primer año de establecimiento, sin embargo, determinaron que si existen diferencias en el tiempo al utilizar una cobertura en dichos cultivos luego de dos años de aplicar los tratamientos. Asimismo, Ureña (2018), no encontró diferencias significativas en la densidad aparente de fincas bananeras con y sin manejo de coberturas, no obstante, en ese caso también las áreas con cobertura tenían menos tiempo de establecidas (aproximadamente tres años), que las áreas dónde no se contaba con dicho sistema de manejo. Por otra parte, Ortega (2013) tampoco encontró diferencias significativas entre tratamientos con y sin el uso de biofermentos en la densidad aparente de suelos bananeros. Estos resultados en la literatura demuestran que para que la densidad aparente cambie por efecto de distintos manejos de coberturas del suelo, se necesita un largo plazo de establecimiento y por lo tanto en el caso de este experimento sería importante repetir la medición de esta variable a un plazo mayor que el acontecido.

La densidad aparente es una variable en la cuál es más difícil encontrar diferencias a compactaciones tan bajas como las medidas en este experimento, distinto a la resistencia a la penetración, donde al medir presión en un área determinada, existe la

suficiente sensibilidad para determinar cambios aún en compactaciones bajas del suelo (Hossne, 2008).

Según el análisis de componentes principales (Cuadro 10), la densidad aparente correlaciona de manera inversamente proporcional con la cantidad de materia orgánica en el primer componente principal, lo que significa que al aumentar el contenido de materia orgánica del suelo disminuye su densidad aparente y viceversa. Los suelos con bajos contenidos de materia orgánica no logran propiciar que el microbiota ejerza su función de cementación necesaria para mejorar la estructura del suelo, por lo que los efectos de la compactación no pueden ser contrarrestados y tienen como resultado un aumento en los valores de la densidad aparente (*Mahal et al.*, 2019).

### **5.2.3. Temperatura del suelo.**

La mayor temperatura fue encontrada en el tratamiento de control químico con respecto al tratamiento de libre crecimiento (Figura 4), esto se debe al efecto que provocan las coberturas al intervenir en el impacto directo de la radiación solar, provocando un amortiguamiento de la conductividad térmica del perfil, en un suelo desnudo, la capa superficial posee poca humedad, mientras que con el uso de una cobertura las capas menos profundas del suelo obtienen mayores contenidos de humedad, y es en dicho estrato superficial donde ocurren los cambios más radicales de la capacidad calórica del suelo (Sauer y Peng, 2018). Por su parte, Kaur y Kaur (2019) encontraron diferencias significativas al utilizar sistemas de coberturas en el cultivo de maíz, respecto a tratamientos con suelo desnudo, realizaron mediciones a 10 cm de profundidad donde la temperatura del suelo fue menor en el sistema con cobertura contra el suelo desnudo, esta diferencia se acrecentó aún más en mediciones realizadas a cinco centímetros de profundidad.

El análisis de componentes principales (Figura 16), agrupa la temperatura del suelo dentro del tercer componente, lo que corrobora el efecto de los tratamientos sobre esta variable. Este componente detalla una correlación negativa entre la temperatura y la respiración del suelo, esto podría estar relacionado a que temperaturas del suelo altas y muy variables afectan el metabolismo microbiano, disminuyendo su actividad en

detrimento de los procesos biológicos que se desarrollan en las capas superficiales del suelo (Séguy *et al.*, 2006).

#### **5.2.4. Erosión hídrica.**

En la variable de erosión existe un contraste entre el tratamiento de control químico con respecto al tratamiento de libre crecimiento (Figura 12), la cantidad de suelo erosionado tiene un aumento proporcional a la precipitación semanal acumulada, esto coincide con lo encontrado por Murillo *et al.*, (2016) comparando sistemas de suelo descubierto con hasta 1,8 ton/ha/año de erosión en suelos bananeros de clase uno, contra 0,5 ton/ha/año de suelo erosionado utilizando a *Geophila macropoda* como cobertura en el mismo tipo de suelo. Cuando el suelo descubierto se somete a un evento de alta precipitación, las gotas de agua golpean la superficie arrojando escombros alrededor del sitio de impacto, al llegar a saturación, el agua se desplaza de manera horizontal por la superficie arrastrando estos escombros, esta escorrentía produce tensiones de corte en las partículas del suelo, menores a las producidas por las gotas de lluvia, sin embargo, al actuar en áreas más grandes y por mayor tiempo, logran soltar partículas de mayor tamaño (Chesworth, 2008). En suelos con coberturas la mayor parte de la energía de la gota se pierde al chocar con las hojas, además, la presencia de raíces en los primeros centímetros del perfil conserva mejor la estructura del suelo sujetando las partículas, mejorando la infiltración del agua y disminuyendo el tiempo en llegar a saturación (Ola *et al.*, 2015; Magdoff y van Es, 2009). Si un evento de precipitación es tal, que el suelo llega a saturación, la escorrentía superficial tiene a la cobertura como obstáculo para transportar las partículas del suelo de un lugar a otro (Shaxson y Barber, 2005; Magdoff y van Es, 2009). Los suelos desnudos se degradan porque el horizonte más dinámico del suelo, la capa superficial, enriquecida en materia orgánica, se elimina por erosión, lo que a su vez también causa la pérdida de partículas del suelo más finas y que son más fáciles de transportar (Magdoff y van Es, 2009; Weil y Brady, 2017).

En los tratamientos de control mecánico y control mecánico+biol, coberturas como *Geophila macropoda* permiten unir mejor la estructura del suelo debido a sus raíces fibrosas (Vargas-Castillo y Abdelnour-Esquivel, 2010), es por esta razón que las pérdidas

del suelo por erosión son menores comparadas con el tratamiento de control químico, aun teniendo valores de escorrentía similares entre tratamientos (Figuras 12 y 13).

En el análisis de componentes principales (Cuadro 10), agrupa la variable de erosión dentro del tercer componente, esto indica que la variabilidad dentro de este componente responde al efecto de los tratamientos, la pérdida de la capa superficial del suelo por causa de la erosión, disminuye la posibilidad de que microorganismos del suelo degraden la materia orgánica, un efecto similar al que causan las altas temperaturas del suelo sobre la microbiota y la cuál es una variable que responde proporcionalmente al efecto de la erosión en la tercer componente de este análisis.

### **5.2.5. Textura.**

Aunque se exhibe una diferencia significativa en la cantidad de limo entre los tratamientos de control mecánico y control mecánico + biol con respecto al tratamiento de control químico y el tratamiento de libre crecimiento (Cuadro 3), todos pertenecen al mismo nombre textural franco arenoso, según lo indicado por el triángulo de texturas (Figura 6), esto coincide con lo encontrado por Largaespada y Henríquez (2015) y Arias *et al.*, (2010) en suelos bananeros de la zona atlántica de Costa Rica, donde reportan hasta cinco distintas clases texturales en la superficie del suelo (0-30 cm), que van desde franco hasta franco arcilloso.

En el análisis de componentes principales (Figura 16), agrupa esta variable en el primer componente, el contenido de arena correlaciona negativamente con los porcentajes de arcillas y limos en el suelo; la arena al ser el mayor componente textural, si se somete a un cambio positivo o negativo va a tener una repercusión inmediata en los porcentajes de limo y arcilla en el suelo (Arias *et al.*, 2010a).

## **5.3. Variables químicas.**

### **5.3.1. Aporte de materia seca.**

Al no existir diferencias significativas en el aporte de materia seca, entre los tratamientos de control mecánico y control mecánico + biol (Cuadro 4), queda

demostrado que la aplicación de bioles no mejora la absorción de nutrientes por parte del sistema de coberturas. Sánchez (2018) comparó el aporte de materia seca de las coberturas en fincas con baja fertilidad (2222 Kg ms/ha/año) y fincas con alta fertilidad (5349 Kg ms/ha/año), estos datos pueden diferir de los mostrados en esta investigación, por la cantidad de ciclos de control, ya que si se da mayor tiempo para chapear las coberturas, las mismas alcanzan mayor índice de biomasa; otro factor importante es la época de recolección de datos, en verano las plantas necesitan más tiempo para desarrollarse del que se necesita en época lluviosa.

Se destaca el contenido de nitrógeno y fósforo en ambos sistemas de coberturas (Cuadro 4), estos elementos son de gran importancia para los suelos bananeros, ya que el nitrógeno es clave en el metabolismo de microorganismos especializados en la descomposición de la materia orgánica y el potasio es el elemento de mayor absorción del cultivo de banano (Segura *et al.*, 2010; Segura y Stoorvogel, 2018; Arias *et al.*, 2003).

### **5.3.2. Materia Orgánica.**

No se encontraron diferencias significativas entre tratamientos (Cuadro 5), aún con niveles intermedios de materia orgánica en el suelo, esto se debe a que las aplicaciones nitrogenadas constantes como es el caso del cultivo del banano, estimulan microbios del suelo que se alimentan de la materia orgánica a tal punto que se disipa antes de ser mineralizada (Russel *et al.*, 2009), Khan *et al.*, 2007) y Mulvaney *et al.*, 2009), esto conlleva a disminuir los efectos de cementación de agregados y formación de humus, necesarios para la disminución de la compactación, estabilización de la estructura del suelo y reducción de las pérdidas de suelo por erosión y escorrentía (Mahal *et al.*, 2019). Este comportamiento se evidencia en el primer componente principal, con la alta correlación negativa que existe entre el contenido de materia orgánica en el suelo y la densidad aparente (Cuadro 10). Desbalances en la relación del nitrógeno y carbono del suelo también fueron encontrados por Sánchez (2018), en sistemas de cobertura establecidos en plantaciones bananeras de la zona atlántica costarricense, sin embargo, estos resultados no concuerdan con los encontrados por Serrano *et al.*, (2010), donde el testigo a libre crecimiento obtuvo niveles de materia orgánica significativamente mayores

al tratamiento con control químico, sin embargo, el periodo de establecimiento de la investigación fue de un año más que esta práctica dirigida. Los valores de materia orgánica obtenidos (Cuadro 5), son muy similares a los encontrados para la bananera San Pablo por Arias *et al.*, (2010a), los autores relacionan dicho contenido a las deposiciones aluviales frecuentes en estos suelos.

### **5.3.3. pH.**

Los valores de pH encontrados en los distintos tratamientos no variaron significativamente (Cuadro 6), sin embargo, son típicos de suelos bananeros causado por las constantes fertilizaciones nitrogenadas (Arias *et al.*, 2010a; Segura *et al.*, 2015). Asimismo, Ortega (2013) no encontró diferencias en el pH del suelo al aplicar biofermentos en el cultivo de banano, comparando contra áreas a las cuales no se les aplicó biofertilizantes. Por su parte, Acón-Ho *et al.*, (2013), no encontraron diferencias en el pH al comparar la aplicación de tres fuentes nitrogenadas distintas y asocian este comportamiento a la capacidad tampón de los suelos aluviales calcáreos que contienen altos niveles de bases y pueden contrarrestar el efecto acidificante en el corto plazo; Arias *et al.*, (2010b), también relacionan la capacidad tampón con la mineralogía de las arcillas presentes en los suelos aluviales.

El análisis de componentes principales (Figura 16), en el componente tres correlaciona el pH de manera inversamente proporcional con la temperatura, lo que indica que un aumento en la temperatura del suelo se asocia a una disminución del pH, y se justifica con la correlación negativa que indica el mismo análisis con respecto a la respiración del suelo. Por lo tanto, a mayores temperaturas la vida microbiana se ve directamente afectada y todos los procesos metabólicos donde los microorganismos interactúan con ácidos orgánicos liberados por las raíces, así como, la metabolización de nutrientes para disponerlos para las plantas disminuye y como consecuencia puede inducir una disminución progresiva del pH del suelo (Séguy *et al.*, 2006).

### **5.3.4. Fertilidad.**

No existieron diferencias significativas entre los tratamientos con respecto a los nutrientes del análisis químico del suelo (Cuadro 7), sin embargo, queda en evidencia los

altos niveles de potasio y fósforo encontrados en los distintos tratamientos y el testigo, consecuencia del efecto de la constante aplicación de fertilizantes y la acumulación de nutrientes por la poca capacidad microbiológica para degradar y disponer de estos elementos a las plantas.

El análisis de componentes principales (Cuadro 10) muestra que existen altas correlaciones en nutrientes como el Calcio, Potasio, Fósforo y Zinc; y se destaca en especial que el aumento del calcio en el suelo tiene una repercusión en la disminución de los contenidos de Potasio, típico de la interacción de estas bases en el suelo, con el fin de encontrar un equilibrio, necesario para la absorción eficiente por parte del cultivo (Andrade y Martínez, 2014).

#### **5.4. Variables biológicas.**

##### **5.4.1. Biomasa microbiana.**

Los datos de biomasa microbiana para los tratamientos no difieren entre sí, sin embargo, existe un comportamiento donde el tratamiento de control químico posee menor cantidad de mg C/Kg de suelo (Figura 13), esto datos son similares a los que presenta Ortega (2013), muestreados en épocas de precipitación media y a los encontrados por Guillén *et al.*, (2006) en cafetales y bosques secundarios en épocas de baja precipitación, ambas investigaciones relacionan mayores precipitaciones con el aumento de la biomasa microbiana.

Compant *et al.*, (2019), indican que los factores ambientales como la sequía afectan el microbiota, además, la sensibilidad a pequeños cambios en propiedades del suelo influye en su metabolismo como los contenidos de materia orgánica, la temperatura, el pH, entre otros (Franchini *et al.*, 2007; Zhong *et al.*, 2015; Benintende *et al.*, 2008).

En el análisis de componentes principales (Cuadro 10), la variable de biomasa microbiana no obtuvo una alta correlación con ninguno de los tres principales componentes.

##### **5.4.2. Respiración del suelo.**

La menor respiración del suelo en el sistema de control químico con respecto al tratamiento de libre crecimiento (Figura 15), recalca la tendencia mostrada en la variable

de biomasa microbiana, y explica cómo la microbiología se ve afectada al tener la superficie del suelo descubierta; estos resultados concuerdan con lo presentado por Sánchez (2018), donde los suelos con cobertura obtuvieron mayores tasas de respiración con respecto a las áreas de control químico en bananeras del Atlántico de Costa Rica.

De Graaff *et al.*, (2015) afirman que la disminución de la biodiversidad del suelo disminuye las tasas de descomposición de la materia vegetal y la respiración, sin embargo, Rosier *et al.*, (2016) indican que la aplicación de biofertilizantes puede contrarrestar el detrimento de la pérdida de biodiversidad microbiana en el largo plazo; por su parte Bakker *et al.*, (2014) explican que la diversidad o abundancia dada de una población microbiana puede variar en todo el paisaje y es sensible a pequeños cambios en una propiedad del suelo, desencadenando una serie de interacciones microbioma-microbioma, microbioma-planta, planta-planta (Lakshmanan *et al.*, (2014), esto explica muchos de los problemas en producción de cultivos que no pueden ser determinados evaluando sólo características físicas y químicas del suelo, e indica la importancia del estudio de las variables e interacciones biológicas.

En el análisis de componentes principales (Cuadro 10), la respiración del suelo se agrupa en el tercer componente, siendo una variable biológica sensible a cambios en la temperatura, pH y erosión del suelo, corroborando el efecto de los tratamientos en la variabilidad del tercer componente principal.

#### **5.4.3. Diversidad de microartrópodos.**

La cantidad de individuos pertenecientes a familias de colémbolos encontrados (Cuadro 8), se debe a que esta subclase de hexápodos prefieren los primeros tres centímetros del suelo para degradar la materia vegetal que se deposita en la superficie (Eisenbeis y Wichard, 1987) y concuerda con las familias encontradas por Guillén *et al.*, (2006), quienes indican que la humedad y temperatura del perfil superior del suelo afectan la actividad de estos animales, obligándolos a desplazarse verticalmente a profundidades con menor alimento y disminuyendo la diversidad a familias que pueden resistir condiciones más extremas (Nsengimana, 2018).

Los índices de diversidad de Shannon-Wiener de los tratamientos y el testigo (Cuadro 9), fueron superiores a los encontrados por Gagnarli *et al.*, (2015), en viñedos de Italia, lo que demuestra que, aunque el cultivo de banano sea un sistema intensivo, la cantidad de residuos vegetales que quedan por la cosecha son la materia prima para promover poblaciones de microartrópodos necesarios para su degradación (Guillén y Sandoval, 2010).

En el análisis de componentes principales (Cuadro 10), la variable de diversidad de microartrópodos no obtuvo una alta correlación con ninguno de los tres principales componentes del experimento.

### **5.5. Análisis Multivariado de Componentes Principales.**

En el análisis multivariado de componentes principales (Cuadro 10), el tercer componente agrupa tres de las variables que respondieron a la influencia de los tratamientos. En el primer componente las variables incluidas responden a la influencia de la materia orgánica y en el componente dos se encuentran relaciones donde un aumento en el contenido de calcio disminuye la disponibilidad del potasio, el fósforo y el zinc.

Este análisis deja claro que los tratamientos no ejercen suficiente influencia sobre las variables agrupadas en los primeros dos componentes, y que se necesitaría más tiempo para que los tratamientos efectúen cambios en variables como la materia orgánica y la densidad aparente. De aquí radica la importancia de realizar este tipo de análisis donde se contempla el efecto de la variabilidad de los datos, aún en variables que no fueron influenciadas por los tratamientos del experimento.

## 6. CONCLUSIONES.

El uso de coberturas vivas sobre el suelo durante tres años mejoró la salud del suelo, disminuyendo la resistencia a la penetración en la capa superficial, contrarrestando las altas temperaturas en la superficie del suelo, disminuyendo la pérdida del suelo por erosión y aumentando la respiración del suelo, en una finca bananera de Siquirres, Limón, Costa Rica.

El sistema de manejo con coberturas de libre crecimiento con tres años de establecimiento en el cultivo de banano disminuyó la temperatura de los primeros 10 cm del suelo en 0,6 °C, en comparación con el sistema de manejo con suelo descubierto a base de control químico.

Los sistemas de manejo con coberturas vivas con tres años de establecimiento en el cultivo de banano disminuyeron la erosión hídrica en más de dos toneladas por hectárea, al compararlo con el sistema de suelo descubierto por medio de control químico, aun así, durante este periodo no se logró percibir efectos significativos de las coberturas sobre la textura, y la densidad aparente.

El aporte estimado de materia seca por la parte aérea de las coberturas en el cultivo de banano se mantuvo entre 1000 y 1200 Kg por hectárea por año, sin embargo, durante los tres primeros años de establecimiento de las coberturas, este aporte no influyó de manera significativa sobre las variables químicas del suelo como la materia orgánica, la acidez del suelo y la fertilidad en general.

Los sistemas de manejo con coberturas en banano aumentaron la respiración del suelo en más de 10  $\mu\text{mol}$  de  $\text{CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , en comparación al sistema de manejo de suelo descubierto a base de control químico, aun así, no hubo diferencias significativas en la biomasa microbiana y en la diversidad de macroartrópodos.

## 7. LITERATURA CITADA.

- Acón-Ho, J.; Alpízar-Oses, L.; Wingching-Jones, R. 2013. Percolación y lixiviación de nutrientes en suelos bananeros al este del río reventazón, Costa Rica. *Agronomía Mesoamericana*. 24(2):329-336 p.
- Acosta, L.; Agüero, R. 2002. Combate de *Panicum zizanoides* H.B.K. y *Paspalum conjugatum* Beg. en banano (*Musa AAA*) en el trópico húmedo de Costa Rica. *Agronomía Mesoamericana*. 13(2): 117-121p.
- ADC Bioscientific LTD. 2015. User Manual LCi and LC pro Soilhood. Issue 2B.6 p.
- Andrade, M.; Martínez, M. 2014. Fertilidad del suelo y parámetros que la definen. 3ª edición. Logroño: Universidad de la Rioja, Servicio de publicaciones. (Material didáctico. *Agricultura y alimentación*; 03): 29 p.
- Araya, M.; Acuña, O.; Mata, R.; Serrano, E.; Tapia, A. 2014. Efecto de la aplicación de compost y nematicida sobre la dinámica de las poblaciones de microorganismos, nematodos fitoparásitos del suelo y la salud del sistema radical en el cultivo del banano (*Musa AAA*) sembrado en domos. *Agronomía Costarricense*. 38(2):93-105 p.
- Arias, F.; Segura, R.; Serrano, E.; Bertsch, F.; López, A.; Soto, E. 2003. Niveles críticos de calcio, magnesio, potasio y fósforo en suelos dedicados al cultivo de banano (*Musa AAA*) en Costa Rica. *CORBANA*. 29(56): 69-81 p.
- Arias, F.; Mata, R.; Alvarado, A.; Serrano, E.; Laguna, J. 2010a. Caracterización química y clasificación taxonómica de algunos suelos cultivados con banano en las llanuras aluviales del caribe de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*. 34(2): 177-195 p.
- Arias, F.; Mata, R.; Alvarado, A.; Serrano, E.; Laguna, J. 2010b. Mineralogía de la fracción arcilla de algunos suelos cultivados con banano en las llanuras aluviales del caribe de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*. 34(2): 197-222 p.
- Bakker, M.; Schlatter, D.; Otto-Hanson, L.; Kinkel, L. 2014. Diffuse symbioses: roles of plant–plant, plant–microbe and microbe–microbe interactions in structuring the soil microbiome. *Molecular Ecology*. 23: 1571–1583 p.
- Benintende, S.; Benintende, M.; Sterren, M.; De Battista, J. 2008. Soil microbiological indicators of soil quality in four rice rotations systems. *Ecological Indicators*. 8:

704–708 p.

- Brenes, S.; Méndez-Estrada, V.; Murillo, J. 2016. Efecto de *Geophila macropoda* (Rubiaceae) como arvense de cobertura en la erosión hídrica en bananales de Guápiles, Limón, Costa Rica. Cuadernos de Investigación UNED. 8(2): 217-223 p.
- Castiglioni, M.; Navarro, R.; Eiza, M.; Romaniuk, R.; Beltran, M.; Mousegne, F. 2016. Respuesta en el corto plazo de algunas propiedades físicas a la introducción de cultivos de cobertura. Ciencia del Suelo (Argentina). 34(2): 263-278 p.
- Campitelli, P.; Aoki, A.; Gudelj, O.; Rubenacker, A.; Sereno, R. 2010. Selección de indicadores de calidad de suelo para determinar los efectos del uso y prácticas agrícolas en un área piloto de la región central de Córdoba. Ciencia del Suelo (Argentina). 28(2): 223-231 p.
- Chesworth, W. 2008. Encyclopedia of soil science. Springer. Encyclopedia of Earth Sciences Series.
- Compant, S.; Samad, A.; Faist, H.; Sessitsch, A. 2019. A review on the plant microbiome: Ecology, functions, and emerging trends in microbial application. Journal of Advanced Research. 19: 29–37 p.
- CORBANA. 2014. Manipulación, conservación y desechos de muestras. Pococí. CR. Corporación Bananera Nacional (CORBANA. S.A.). 6 p.
- CORBANA. 2019. [www.corbana.co.cr](http://www.corbana.co.cr). Último acceso: 25/11/2019.
- De Graaff, M.; Adkins, J.; Kardol, P.; Throop, H. 2015. A meta-analysis of soil biodiversity impacts on the carbon cycle. SOIL. 1: 257–271 p.
- Delgado, E; Rosales, F. Trejos, J; Villalobos, M; Pocasangre, L. 2010. Índice de calidad y salud de suelos para plantaciones bananeras en cuatro países de América Latina y el Caribe. Bioagro. 22(1): 53-60 p.
- Díaz-Romeu, R.; Hunter, A. 1978. Metodología de muestreo de suelos, análisis químico de suelos y tejido vegetal e investigación en invernadero. Centro Agronómico de Investigación y Enseñanza (CATIE). Turrialba. CR. 61 p.
- Doran, J.; Parkin, T. 1996. Quantitative indicators of soil Quality: a minimum data set. In: Methods for assessing Soil Quality, SSSA Special Publication. 49: 25-37 p.
- Doreste, E. 1984. Acarología. Serie investigación y desarrollo. Instituto Interamericano

- de Cooperación para la Agricultura. No. 11.
- Eijkelkamp.2013. Penetrologger: Operating instruction. Netherlands. Eijkelkamp Agrisearch Equipment. 40 p.
- Eisenbeis, G.; Wichard, W. 1987. Atlas on the Biology of Soil Arthropods. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 437 p.
- FAO. 2011. Guía para los responsables de las políticas de intensificación sostenible de la producción agrícola. 112 p.
- FAO. 2019. Standard operating procedure for soil total carbon. Dumas dry combustion method. 10 p.
- FAO y GTIS. 2015. Estado Mundial del Recurso Suelo (EMRS) – Resumen Técnico. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura y Grupo Técnico Intergubernamental del Suelo, Roma, Italia.
- Fernández, R.; Quiroga, A.; Noellemeyer, E. 2012. Cultivos de cobertura, ¿una alternativa viable para la región semiárida pampeana? Ciencia del Suelo (Argentina). 30(2): 137-150 p.
- Ferrera, R.; Alarcón, A. 2001. La microbiología del suelo en la agricultura sostenible. Ciencia Ergo Sum. 8(2): 175-183 p.
- Fischer, G.; Torres, F.; Torres, J. 2014. Efecto de la temperatura del suelo sobre la planta. Revista Comalfi. 24(3): 78-92 p.
- Forsythe, W. 1985. Física de Suelos: manual de laboratorio. 1ª ed. 2ª reimpresión. San José C.R. IICA. 212 p.
- Forsythe, W. 2002. Parámetros ambientales que afectan la temperatura del suelo en Turrialba, Costa Rica y sus consecuencias para la producción de cultivos. Agronomía Costarricense. 26(1): 43-62.
- Forsythe, W.; Tafur, N. 1985. The effect of various methods of land preparation on soil resistance to penetration and yields of com (*Zea mays* L), cassava (*Manihot esculenta* CRANTZ), and sweet potato (*Ipomea batatas* L.) in association. I. Effect of cropping systems and land preparation on the soil. Turrialba 35 :357 – 370 p.
- Franchini, J.; Crispino, C.; Souza, R.; Torres, E.; Hungria, M. 2007. Microbiological parameters as indicators of soil quality under various soil management and crop

- rotation systems in southern Brazil. *Soil y Tillage Research*. 92: 18–29 p.
- Gagnarli, E.; Goggioli, D.; Tarchi, F.; Guidi, S.; Nanelli, R.; Vignozzi, N.; Valboa, G.; Lottero, M.; Corino, L.; Simoni, S. 2015. Case study of microarthropod communities to assess soil quality in different managed vineyards. *SOIL*. 1: 527–536.
- Gómez-Gómez, R; González-Lutz, M; Agüero-Alvarado, R; Mexzón-Vargas, R; Herrera-Murillo, F; Rodríguez-Ruiz, M. 2017. Conocimiento sobre coberturas vivas y disposición a utilizarlas por productores de varios cultivos. *Agronomía Mesoamericana*. 28(2): 489-497 p.
- Gowen, S. 1995. *Bananas and Plantains*. Springer Science + Business Media Dordrecht. 612 p.
- Guillén, C.; Sandoval, J. Poblaciones de microartrópodos como bioindicadores de la salud del suelo. *CORBANA*. 35-36(62): 108-110 p.
- Guillén, C.; Soto-Adames, F.; Springer, M. 2006. Variables físicas, químicas y biológicas del suelo sobre las poblaciones de colémbolos en Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 30(2): 19-29 p.
- Henríquez, C.; Cabalceta, G. 2012. *Guía práctica para el estudio introductorio de los suelos con un enfoque agrícola*. 2 ed. San José. CR. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo (ACCS). 112 p.
- Hossne, A. 2008. La densidad aparente y sus implicaciones agrícolas en el proceso expansión/contracción del suelo. *Terra Latinoamericana*. 26(3): 195-202.
- Kalra, Y. 1998. *Handbook of reference methods for plant analysis*. Florida. USA. CRC Press. 289 p.
- Karlen, D.; Mausbach, M.; Doran, J.; Cline, R.; Harris, R.; Schuman, G. 1997. Soil quality: A concept, definition, and framework for evaluation. *Soil Science Society American Journal*. 61: 4-10 p.
- Kaur, R.; Kaur, C. 2019. Soil temperature, PAR interception and crop phenology of maize (*Zea mays* L.) as influenced by straw mulching and herbicides. *International Journal of Agricultural Sciences*. 15(1): 129-136 p.
- Khan, S.; Mulvaney, R.; Ellsworth, T.; Boast, C. 2007. *The Myth of Nitrogen*

- Fertilization for Soil Carbon Sequestration. *Journal Environmental Quality*. 36:1821–1832 p.
- Lakshmanan, V.; Selvaraj, G.; Bais, H. 2014. Functional Soil Microbiome: Belowground Solutions to an Aboveground Problem. *Plant Physiology*. 166: 689-700 p.
- Largaespada, K.; Henríquez, C. 2015. Distribución espacial de la humedad y su relación con la textura en un suelo. *Agronomía Costarricense* 39(3): 137-147 p.
- Lê, S.; Josse, J.; Husson, F. 2008. FactoMineR: An R Package for Multivariate Analysis. *Journal of Statistical Software*. 25(1):1-18 p.
- Maddonni, G.; Urricariet, S.; Ghera, C.; Lavado, R. 1999. Assessing Soil Quality in the Rolling Pampa, Using Soil Properties and Maize Characteristics. *Agronomy Journal*. 91: 280-287 p.
- Magdoff, F.; Van Es, H. 2009. Building soils for better crops: sustainable soil management. SARE/USDA. Handbook Series Book 10. 3<sup>rd</sup> edition. 294 p.
- Mahal, N.; Osterholz, W.; Miguez, F.; Poffenbarger, H.; Sawyer, J.; Olk, D.; Archontoulis, S.; Castellano, M. 2019. Nitrogen Fertilizer Suppresses Mineralization of Soil Organic Matter in Maize Agroecosystems. *Frontiers in Ecology and Evolution*. 7(59): 12 p.
- Mata, R; Sandoval, D. 2016. Mapa digital de suelos de Costa Rica.
- Mehlich, A. 1984. Mehlich 3 Soil test extractant: A modification of Mehlich 2 extractant. *Commun. In Soil Science Plant Analysis*. 15(12): 1409-1416 p.
- Mulvaney, R.; Khan, S.; Ellsworth, T. 2009. Synthetic Nitrogen Fertilizers Deplete Soil Nitrogen: A Global Dilemma for Sustainable Cereal Production. *Journal Environmental Quality*. 38.
- Nisensohn, L; Tuesca, D; Vitta, J. 2011. Características reproductivas de *Commelina erecta* L. asociadas con su propagación en sistemas agrícolas. *Agriscientia*. 28:51-60 p.
- Nsengimana, V. 2018. Use of Soil and Litter Arthropods as Biological Indicators of Soil Quality in Southern Rwanda. Disertación original presentada para la concesión del título de Doctor (PhD) en Agronomía y Bioingeniería. University of Liege - Gembloux Agro Bio-Tech. 99 p.

- Ola, A.; Dodd, I.; Quinton, J. 2015. Can we manipulate root system architecture to control soil erosion? *Soil*. 1: 603-612 p.
- Ortega, R. 2013. Evaluación del efecto de la aplicación de dos recetas de biofermentos (bioles) sobre propiedades físicas, químicas y microbiológicas de un suelo dedicado al cultivo de banano (*Musa AAA*) en el Caribe de Costa Rica. Práctica dirigida para optar al grado de licenciado en Ingeniería Agronómica con énfasis en Fitotecnia. Universidad de Costa Rica.
- Pattison, T & Lindsay, S. 2006. Banana root and soil health user's manual. Department of Primary Industries and Fisheries. The State of Queensland, Australia. 63 p.
- Palacios-Vargas, J. 1983. Catálogo de los colémbolos mexicanos. *Anales de la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas, México*. 27: 61-67 p.
- Paolini, J. 2018. Actividad microbiológica y biomasa microbiana en suelos cafetaleros de los Andes venezolanos. *Terra Latinoamericana*. 36(1): 13-22 p.
- Rivera, S.; Guzmán, Ó.; Zamorano, C. 2010. Arvenses hospedantes de nematodos fitoparásitos en el cultivo de plátano. *Fitopatología Colombiana*. 34(2): 47-51 p.
- Rojas, A. 2011. Prospección de la Entomofauna Benéfica Asociada al Cultivo de Banano (*Musa AAA*), Subgrupo "Cavendish," En La Región Atlántica de Costa Rica. Trabajo final de graduación presentado a la Escuela de Agronomía como requisito parcial para optar el grado de Licenciatura en Ingeniería en Agronomía. Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Rosier, A.; Bishnoi, U.; Lakshmanan, V.; Sherrier, J.; Bais, H. 2016. A perspective on inter-kingdom signaling in plant-beneficial microbe interactions. *Plant Mol Biol*. 90:537-548 p.
- Russel, A.; Cambardella, C.; Laird, D.; Jaynes, D.; Meek, D. 2009. Nitrogen fertilizer effects on soil carbon balances in Midwestern U.S. agricultural systems. *Ecological Applications*. 19(5): 1102-1113 p.
- Sánchez, B. 2018. Evaluación de las condiciones físicas químicas y microbiológicas del suelo con el sistema de cobertura nativa y con manejo convencional en plantaciones de banano (*Musa AAA*), durante dos periodos climáticos en el Caribe de Costa Rica. Práctica dirigida para optar al grado de licenciatura en

Ingeniería Agronómica. Universidad de Costa Rica.

- Sauer, T.; Peng, X. 2018. *Agroclimatology: Linking Agriculture to Climate*. Jerry L. Hatfield, Mannava V.K. Sivakumar, John H. Prueger, editors. ASA, CSSA and SSSA, USA. *Agronomy Monograph* 60.
- Segura, R.; Serrano, E.; Sandoval, J.; Pocasangre, L.; Bertsch, F.; Acuña, O. 2010. Relación entre el pH, condiciones químicas y microbiológicas del suelo aparente (banda y entrecalle) y de la rizósfera con el vigor de la planta de banano. *CORBANA*. 35-36(62): 98-100 p.
- Segura, R; Serrano, E; Pocasangre, L; Acuña, O; Bertsch, F; Stoorvogel, J; Sandoval, J. 2015. Chemical and microbiological interactions between soils and roots in commercial banana plantations (*Musa* AAA, cv. Cavendish). *Scientia Horticulturae*. 197: 66–71 p.
- Séguy, L.; Bouzinac, S.; Husson, O. 2006. Direct-Seeded Tropical Soil Systems with Permanent Soil Cover: Learning from Brazilian Experience. *Biological Approaches to Sustainable Soil system*. 22: 323-342 p.
- Serrano, E.; Zúñiga, J.; Guzmán, M.; Villalta, R. 2010. Efecto del método de control de malezas sobre las propiedades físicas, químicas y microbiológicas del suelo y sobre la producción del banano (*Musa* AAA, CV. GRANDE NAINÉ). *CORBANA*. 35-36(62): 96-98 p.
- Serri, D.; Boccolini, M.; Oberto, R.; Chavarría, D.; Bustos, N.; Vettorello, C.; Apezteguía, H.; Miranda, J.; Alvarez, C.; Galarza, C.; Chiófalo, S.; Manrique, M.; Sueldo, R.; Fernandez, M.; Mattalia, L.; Cholaky, C.; Vargas, S. 2018. Efecto de la agriculturización sobre la calidad biológica del suelo. *Ciencia del Suelo (Argentina)*. 36(2): 92-104 p.
- Simmonds, N.; Shepherd, K. 1955. The taxonomy and origins of the cultivated bananas. *Journal of the Linnean Society of London. Botany*. 55:302-312 p.
- Shannon, C; Weaver, W. 1949. *The mathematical theory of communication*. University of Illinois Press. Urbana, IL, EEUU. 144 pp.
- Shaxson, F.; Barber, R. 2005. Optimización de humedad del suelo para la producción vegetal. El significado de la porosidad del suelo. *Boletín de suelos de la FAO*. 79: 111 p.

- Soil Science Society of America. 2008. Glossary of Soils Science Terms. 88 p.
- Soto, M. 1992. Banano cultivo y comercialización. Litografía e Imprenta LIL, S.A. 2ª. Ed. San José, C.R. 674 p.
- Stoorvogel, J; Segura, R. 2018. Nutrition and soil management in banana cultivation. In Kema, G; Drenth, A (eds.). Achieving sustainable cultivation of bananas: Cultivation techniques. Cambridge, Reino Unido, Burleigh Dodds Science Publishing Limited. 1-12 p.
- Trojer, H. 1966. Algunas características agroclimatológicas del trópico americano. Reunión Internacional sobre problemas de la agricultura en los trópicos húmedos de América Latina. Lima, Perú, Belem, Brasil. IICA, San José, Costa Rica. 17 p.
- Uribe, L. 2006. Los microorganismos del suelo son importantes en la Agricultura Ecológica. Aportes. 132: 26-28 p.
- U.S.D.A. 1977. National Soil Survey Manual.
- Vallejos, C.; Velázquez J. 1998. Evaluación de especies leguminosas como cultivos de cobertura y barreras vivas en el control de la erosión en cafetales jóvenes, Matagalpa, Nicaragua. Trabajo de Diploma. Universidad Nacional Agraria.
- Valverde, E.; Segura, R.; Sandoval, J. 2018. Identificación de plantas indicadoras de condiciones de suelo y salud radical en un sistema de coberturas vivas en el cultivo de banano, con una propuesta integral de manejo. Trabajo de pasantía para CORBANA S.A. (datos sin publicar).
- Van Bruggen, A.; Semenov, A. 2000. In search of biological indicators for soil health and disease suppression. Applied Soil Ecology 15:13-24 p.
- Vance, E.; Brokes, P.; Jenkinson, D. 1987. An extraction method for measuring soil microbial Biomass-C. Soil Biology y Biochemistry 19(159-164): 703-707 p.
- Varela, M.; Fernández, P.; Rubio, G.; Taboada, M. 2011. Cultivos de cobertura: efectos sobre la macroporosidad y la estabilidad estructural de un suelo franco-limoso. Ciencia del Suelo(Argentina). 29(1): 99-106 p.
- Vargas-Castillo, M; Abdelnour-Esquivel, A; 2010. Cultivo in vitro de *Geophila macropoda* (Ruiz & Pav.DC) a partir de embriones cigóticos. Agronomía mesoamericana. 21(1): 73-83 p.
- Vázquez, M.; Palacios-Vargas, J. 2004. Catálogo de colémbolos (Hexapoda:

- Collembola) de Sian Ka'na Quintana Roo, México. Universidad de Quintana Roo. 123 p.
- Weil, R.; Brady, N. 2017. *The Nature and Properties of Soils*. Pearson Education Limited. 15<sup>th</sup> Edition. 1104 p.
- Zaconeta, F. 2000. Identificación de plantas locales como indicadoras de calidad de suelos en parcelas agrícolas, en la microcuenca Luquigüe, Yoro, Honduras. Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Agrónomo en el Grado Académico de Licenciatura. Zamorano carrera de Desarrollo Socioeconómico y Ambiente.
- Zhong, S.; Zeng, H.; Jin, Z. 2015. Soil Microbiological and Biochemical Properties as Affected by Different Long-Term Banana-Based Rotations in the Tropics. *Pedosphere*. 25(6): 868–877 p.
- Zúñiga, J. 2020. Comunicación personal. Departamento Relación Suelo-Planta. Dirección de Investigaciones. CORBANA S.A.

## 8. ANEXOS.



CENTRO DE INVESTIGACIONES AGRONÓMICAS  
LABORATORIO DE RECURSOS NATURALES  
REPORTE DE ENSAYO



N° DE REPORTE: **73855**  
USUARIO: LABORATORIO DE RECURSOS NATURALES  
SUBCLIENTE: TESIS EDGAR VALVERDE  
RESPONSABLE: RAFAEL MATA  
CORREO: rafael.mata@ucr.ac.cr  
TELEFONO: 2511-2084  
PROVINCIA: HEREDIA  
CANTON: SARAPIQUÍ  
LOCALIDAD: LAS HORQUETAS  
CULTIVO: BANANO

ANÁLISIS: CH; C\_Reth (4)  
FECHA RECEPCION: 05/03/2020  
EMISION DE REPORTE: 14/05/2020  
N° DE MUESTRAS TOTAL: 5  
PAGINA: 1/1

ANÁLISIS DE RETENCIÓN DE HUMEDAD, DENSIDADES, POROSIDAD, CONECTIVIDAD DE POROS Y CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA											
ID USUARIO	ID LAB	RETENCIÓN DE HUMEDAD					DENSIDAD Y CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA				
		% Retención				% Agua util	Densidad aparente	Densidad Partículas	Porosidad total	Conectividad de poros	Conductividad Hidráulica
		33 kPa	500 kPa	1000 kPa	1500 kPa						
Ap (33,500,1000,1500 kPa)	RN-20-00222	37	32	32	31	6	1,1	2,6	58	0,462	471
Ab (33,500,1000,1500 kPa)	RN-20-00223	31	26	24	23	8	1,2	2,8	57	0,462	61,40
Bw	RN-20-00224	52	NR	NR	48	4	0,9	2,5	64	0,401	ND
C1	RN-20-00225	42	NR	NR	36	6	1	2,7	63	0,401	76,85
Ab	RN-20-00226	19	NR	NR	14	5	1,3	2,8	54	0,401	1,86
2C2	RN-20-00227	36	NR	NR	29	7	0,9	2,6	65	0,462	ND

ND: No detectable con la metodología aplicada

*Rafael Mata*

Ing. Agr. Rafael Mata Chinchilla M.Sc.  
COORDINADOR DEL LABORATORIO DE RECURSOS NATURALES

1. El muestreo es responsabilidad del usuario. 2. Los resultados se refieren únicamente a las muestras ensayadas. 3. El tiempo de custodia es de 45 días a partir del ingreso de la muestra. 4. El Reporte de Ensayo válido es el original, firmado y sellado. Cuando el usuario solicita el envío del reporte por correo electrónico o fax, libera al Laboratorio de resguardar la integridad y confidencialidad de sus resultados.

### Anexo 1. Análisis de retención de humedad, densidades, porosidad, conectividad de poros y conductividad hidráulica.