



**UNIMINUTO**  
Corporación Universitaria Minuto de Dios  
Educación de calidad al alcance de todos

**EVALUACIÓN DE LA ASOCIACIÓN ENTRE PROPIEDADES EDÁFICAS, HONGOS SOLUBILIZADORES DE FOSFATO, HONGOS FORMADORES DE MICORRIZA ARBUSCULAR Y EL CONTENIDO NUTRICIONAL EN PLANTAS DE BANANO (*Musa paradisiaca* L.).**

**Autor**

**DIANA CAROLINA CASTILLO GÓMEZ**

**CORPORACIÓN UNIVERSITARIA MINUTO DE DIOS  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
INGENIERÍA AGROECOLÓGICA  
BOGOTÁ D.C  
2015**



**UNIMINUTO**  
Corporación Universitaria Minuto de Dios  
Educación de calidad al alcance de todos

**EVALUACIÓN DE LA ASOCIACIÓN ENTRE PROPIEDADES EDÁFICAS, HONGOS SOLUBILIZADORES DE FOSFATO, HONGOS FORMADORES DE MICORRIZA ARBUSCULAR Y EL CONTENIDO NUTRICIONAL EN PLANTAS DE BANANO (*Musa paradisiaca* L.).**

**Autor**

**DIANA CAROLINA CASTILLO GÓMEZ**

**Trabajo de grado (Tesis) para optar el Título de Ingeniera en Agroecología**

**Director**

**Posada Almanza Raúl Hernando**  
*Ph.D. Ciencias*

**Co-Director**

**Higuera Mora Nubia Carolina**  
*M.Sc. Agricultura Ecológica*

**CORPORACIÓN UNIVERSITARIA MINUTO DE DIOS**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**INGENIERÍA AGROECOLÓGICA**  
**BOGOTÁ D.C**  
**2015**

**Nota de aceptación**

---

Jurado

---

Jurado

---

## **DEDICATORIA**

En primera instancia a Dios.

A mi familia por su incondicional amor y apoyo en todo momento, por impulsarme a seguir adelante y nunca desfallecer.

Y a todos mis seres amados.

## AGRADECIMIENTOS

En primera instancia a Dios por permitirme cumplir una nueva etapa en mi vida con su ayuda y compañía, a mis padres y hermana por ser mi motor de vida, impulsarme a seguir adelante para cumplir mis sueños y metas, y por acompañarme en todo momento llenándome de su amor incondicional. A los docentes Raúl Posada, Nubia Higuera y Sair Sierra del programa Ingeniería Agroecológica de UNIMINUTO, por su entrega y compromiso hacia el desarrollo del proyecto, además por todos los conocimientos adquiridos que nos contribuyen tanto a nivel personal como profesional, así como el grupo de trabajo CENIREC por su colaboración a lo largo del proyecto.

A toda mi familia, compañeros y amigos por su compañía y colaboración a lo largo de este proceso. El estudio fue financiado por el Ministerio de Agricultura, Contrato N° CE-13158-104-10, además a Erika Moreno, asistente del laboratorio calle 90 de UNIMINUTO, de manera especial un agradecimiento para el Dr. Ewald Sieverding y la Doctora Cinthya Ivonne Becerra por su colaboración en los procesos de identificación de HMA y HSP. También a la Corporación Universitaria Minuto De Dios (UNIMINUTO) por permitirnos realizar este tipo de proyectos investigativos y tener diferentes semilleros dentro del programa, por último pero no menos importante al semillero de investigación de “Bioprocesos en agroecosistemas y sistemas naturales intervenidos”.

## RESUMEN

La producción de banano (*Musa paradisiaca*) corresponde aproximadamente al 12 % del total de frutas en el mundo, debido a sus aportes de nutrición y energía, además sus plantaciones extraen grandes cantidades de nutrientes del suelo, cuyas funciones son importantes para la fisiología de la planta. La simbiosis de los hongos micorrícicos arbusculares (HMA) es una asociación mutualista formada entre plantas y hongos, donde ambas partes tienen ventajas de esta relación. La colonización por HMA cambia en la planta aspectos relacionados con su fisiología como la fotosíntesis, producción de fitohormonas, disminuye la permeabilidad de las membranas. Por otro lado, en el suelo es común encontrar hongos microscópicos filamentosos, dentro de este grupo se encuentran los hongos solubilizadores de fosfatos (HSP), que mediante diferentes mecanismos liberan los fosfatos capturados en la fracción mineral y lo hacen disponible para las plantas. Diferentes estudios muestran que la co-inoculación de HMA y HSP pueden aumentar la biomasa de la planta, la concentración de P de los tejidos vegetales, la actividad microbiana del suelo y modificar otras propiedades edáficas. La presente investigación tiene por objeto determinar la asociación entre algunos parámetros edáficos y biológicos de suelo con el contenido nutricional (P foliar) en plantas de banano, en tres zonas de Colombia: Zona 1- Cundinamarca, Zona 2-Antioquia y Zona 3- Magdalena, siendo estas dos últimas zonas reconocidas por su alta producción de banano en cultivo convencional. Para ello se realizaron pruebas foliares y de suelos en el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), para determinar el contenido de fósforo total en tejido vegetal y en suelo para determinar la capacidad de intercambio catiónico, el contenido de calcio, magnesio, potasio, sodio, fósforo, aluminio de cambio, saturación de bases, carbón orgánico, y pruebas de textura y pH. Adicional a esto, se realizó el aislamiento e identificación de HMA y HSP, además la cuantificación de la colonización por HMA en la raíz. Para analizar los resultados, se realizó un análisis de componentes principales (ACP) para encontrar variables o conjuntos de variables con mayor influencia sobre los parámetros y un análisis de varianza-covarianza por medio de modelos basados en ecuaciones estructurales con el fin de evaluar las relaciones directas e indirectas entre

las 16 variables influyentes en los parámetros: arena, limo, arcilla, pH, carbono orgánico, capacidad de intercambio catiónico, calcio, magnesio, potasio, sodio, fósforo disponible, fósforo total, fósforo foliar, colonización por HMA (ColHMA), humedad y la abundancia de HSP, para determinar los modelos. Los contenidos de fósforo disponible y de fósforo total fueron mayores en las fincas de la zona 1 mientras que la arcilla y el carbono orgánico fueron más variables entre fincas. Se encontraron 15 géneros de HMA: *Acaulospora*, *Ambispora*, *Archaeospora*, *Clareideoglossum*, *Entrophospora*, *Funneliformis*, *Gigaspora*, *Glomus*, *Intraspora*, *Kuklospora*, *Pacispora*, *Paraglossum*, *Redeckera*, *Septoglossum* y *Simiglossum*. De los aislamientos de HSP, de las tres zonas se identificaron: 9 morfoespecies, 8 géneros correspondientes a *Penicillium*, *Paecilomyces*, *Alysidium*, *Humicola*, *Fusarium*, *Aureobasidium*, *Coniothyrium* y *Aspergillus*, además de *Mycelia sterilia*. Los tres principales componentes explicaron el 73% de la varianza total de los datos. A partir del ajuste del modelo previo, el fósforo foliar presentó un  $r^2 = 0,298$ , los HSP un  $r^2 = 1,0139$  y la colonización por HMA (ColHMA) un  $r^2 = 0,950$ , estos valores representan el grado de explicación de la variable respuesta a partir de las variables influyentes. Las relaciones más importantes en el presente estudio fueron: el pH y la colonización por hongos formadores de micorriza arbuscular sobre el fósforo foliar; el fósforo total, limo, el sodio y la humedad con la colonización por HMA y por último la colonización por HMA, fósforo disponible y total hacia la abundancia de HSP, además de los HSP hacia el fósforo disponible. Finalmente, a pesar de que los sitios de muestreo tengan parámetros edáficos particulares, hay patrones repetitivos que se pueden comprender al estudiar el conjunto de interacciones en varios entornos agrícolas, en el caso de los HMA y HSP en cultivos de banano, brindan una perspectiva de lo que sucede con las poblaciones.

**Palabras Clave:** Abundancia de hongos solubilizadores de fosfato, Colonización por hongos formadores de micorriza arbuscular, Análisis de componentes principales, Modelos basados en ecuaciones estructurales, Relación nutrientes tejido vegetal-suelo.

## TABLA DE CONTENIDO

<u>DEDICATORIA</u> .....	4
AGRADECIMIENTOS .....	5
RESUMEN .....	6
ÌNDICE DE TABLAS .....	11
ÌNDICE DE FIGURAS.....	12
ÌNDICE DE ANEXOS .....	13
1. INTRODUCCIÓN .....	14
2. ANTECEDENTES. ....	17
3. ESTADO ACTUAL DEL PROBLEMA.....	20
4. JUSTIFICACIÓN. ....	24
4.1 Precios de producción .....	24
4.2 Impacto ambiental .....	26
4.3 Inocuidad y soberanía alimentaria.....	27
5. OBJETIVOS. ....	29
5.1 Objetivo General .....	29
5.2 Objetivos específicos.....	29
6. MARCO TEÓRICO.....	30
6.1 Hongos formadores de micorriza arbuscular (HMA) .....	30
6.2 Hongos solubilizadores de fosfatos (HSP).....	31
6.3 Contenido nutricional en banano (potasio, fosforo, nitrógeno, azufre) .....	32

6.4	Propiedades edáficas en el cultivo de banano .....	34
6.5	Banano (variedades, fenología, condiciones ideales para su conocimiento, monocultivos y policultivos).....	34
6.5.1	Generalidades .....	34
6.5.2	Fenología y tiempo de crecimiento .....	35
6.5.3	Fertilización .....	39
6.5.4	Aspectos económicos .....	41
7.	MÉTODOS .....	42
7.1	Selección de sitios de muestreo.....	42
7.2	Muestreo.....	48
7.2.1	Muestreo de suelo.....	48
7.2.2	Muestreo foliar .....	48
7.3	Laboratorio.....	49
7.3.1	Preparación y separación de muestras .....	49
7.2.2	Aislamiento e identificación de HMA.....	50
7.2.3	Cuantificación de colonización por HMA.....	51
7.2.4	Aislamiento e identificación de HSP .....	53
7.4	Análisis de datos .....	54
8.	RESULTADOS.....	57
8.1	Factores que pueden influir en el contenido nutricional de las plantas de banano .....	57
8.2	HMA y HSP encontrados en las tres zonas muestreadas .....	59
8.3	Colonización de raíces por HMA.....	65
8.4	Análisis de componentes principales (ACP).....	65
8.5	Análisis de varianza- covarianza.....	67
8.5.1	Relaciones entre hongos formadores de micorriza arbuscular, hongos solubilizadores de fosfatos, nutrición de las plantas y propiedades edáficas.....	67

9.	DISCUSIÓN .....	70
10.	CONCLUSIONES .....	79
11.	RECOMENDACIONES .....	80
12.	BIBLIOGRAFÍA .....	81

## ÌNDICE DE TABLAS.

Tabla 1. Costos, precios y producción del banano en el Magdalena, 2008. Fuente: Banco Agrario - Gerencia Banca Agropecuaria (Hoz, 2008).....	25
Tabla 2. Fases fenológicas del banano, fuente Soto (1998).....	36
Tabla 3. Duración y tiempo acumulado promedio en los estados fenológicos en el banano .....	37
Tabla 4. Recomendación de fertilización (INIAP) Fuente: (Cadena, 2009).....	39
Tabla 5. Producción de banano, superficie cosechada y rendimientos en Antioquía y Magdalena, 1992 y 2001. Fuente: Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, Colombia. ....	41
Tabla 6. Características geográficas de las fincas de la zona 1- Cundinamarca.....	42
Tabla 7. Características geográficas de las fincas de la zona 2- Antioquia. ....	44
Tabla 8. Características geográficas de las fincas de la zona 3- Magdalena Medio. ....	46
Tabla 9. Promedio de observaciones $\pm$ error estándar para las variables físico- químicas, edáficas y biológicas en las 12 fincas bananeras muestreadas en las 3 zonas. ....	58
Tabla 10. Ajuste del modelo conceptual inicial con el modelo final ( $r^2$ , $\chi^2$ , probabilidad asociada “P”) y efectos estandarizados.....	68

## ÌNDICE DE FIGURAS.

Figura 1. Fases del proceso de desarrollo del cultivo de banano Torres (2012).....	38
Figura 2. Representación esquemática de la curva de crecimiento de una planta de banano y su "retorno" o hijo (Soto, 2002). .....	38
Figura 3.Localización de las fincas muestreadas en Cundinamarca.....	43
Figura 4.Localización de las fincas muestreadas en Antioquia. ....	45
Figura 5.Localización de las fincas muestreadas en Magdalena. ....	47
Figura 6. Muestreo foliar en banano para determinar el contenido de nutrientes (Espinosa & Mite, 2002).....	49
Figura 7. Porcentaje de colonización por HMA. ....	53
Figura 8.Eficiencia relativa de solubilización.....	54
Figura 9. Modelo conceptual de relaciones entre las variables independientes y de respuesta. Las flechas indican asociaciones hipotéticas y regresiones entre dos variables.....	56
Figura 10. Morfoespecies de HMA encontrados en las tres zonas muestreadas .....	60
Figura 11. Especies de HMA en cada zona y especies comunes entre zonas.....	61
Figura 12. Morfoespecies de HSP encontrados en las zonas de estudio .....	63
Figura 13. Morfoespecies no identificadas, géneros y/o especies de HSP encontrados en cada zona muestreada y cuales son comunes entre zonas. ....	64
Figura 14. Colonización por hongos formadores de micorriza arbuscular.....	65
Figura 15. Proyección de los casos en el factor-plano (1x2). ....	66
Figura 16. Modelo conceptual definitivo de las relaciones directas de mayor importancia en el estudio.....	69

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Composición del medio de cultivo Sundara & Sinha (S&S). .....	103
Anexo 2. Datos fisicoquímicos de los muestreos de suelo y foliar, colonización de la raíz. ....	104
Anexo 3. Cargas factoriales de componentes principales.....	107

## 1. INTRODUCCIÓN

De acuerdo con la FAO (2002), la producción de banano corresponde aproximadamente al 12 % del total de frutas en el mundo, se le considera originario de las regiones tropicales y húmedas de Asia, según la variedad de la planta del banano alcanza de 3 hasta 7 metros de altura y un racimo puede llegar a tener 100 a 400 frutos, cada uno llega a tener de 8 a 20 centímetros de largo con un peso aproximadamente de 50 Kg. Su mercado en el mundo es principalmente de consumo en fresco y una cantidad mínima es destinada a procesos industriales como materia prima para la obtención de productos alimenticios, además los subproductos o abonos orgánicos que proceden del vástago, los residuos de cosecha, fibras y papel a base de los pseudotallos, alcohol, vinagre de la fermentación de la fruta se incorporan al sistema productivo. El banano es una de las frutas más vendidas por sus aportes de nutrición y energía (Anacafé, 2004).

Por otra parte, la simbiosis de los hongos micorrícicos arbusculares (HMA) es una asociación mutualista formada entre plantas y hongos, donde ambas partes tienen ventajas de la simbiosis, los HMA obtienen fotosintatos, mientras que la planta obtiene de los hongos nutrientes como fosfato inorgánico a través de las hifas (Osorio *et al.* 2008). Los hongos micorrícicos arbusculares forman una parte medular de la rizósfera que se caracteriza por crecer en el interior de la raíz de la planta hospedera, este hongo presenta competencia y/o antagonismo con otros microorganismos del suelo, sin embargo, tiene asegurado el suministro de nutrimentos de la planta hospedera, lo cual le permite tanto una mayor biomasa cercana a la raíz como una mayor influencia en la planta (Jaramillo, 2011).

Los hongos formadores de micorriza arbuscular se han considerado simbióticos obligados, debido a que no pueden completar su ciclo de vida sin establecer simbiosis con la planta, sin embargo diversos estudios sobre estos hongos (Habte & Osorio, 2001; Osorio, Sánchez, & Molano, 2008; Smith & Read, 2008; ; Zhang *et al.* 2011), han demostrado que existen especies de las cuales se desconoce su nutrición, además son capaces de crecer dentro de las raíces sin causar síntomas de enfermedad, coloniza las raíces con sus hifas, formando arbusculos con los cuales mantiene un intercambio bioquímico con la planta. La colonización de HMA cambia en la planta aspectos relacionados con su fisiología como la fotosíntesis, producción de fitohormonas,

disminuye la permeabilidad de las membranas afectando la dinámica de los exudados de la raíz con lo que se afecta la micro-flora de la rizósfera (Jaramillo, 2011).

Además de los HMA, en el suelo es común encontrar hongos microscópicos filamentosos, los cuales se producen de manera natural por esporas sexuales o asexuales (Vargas & Villamizar, 2005), fisiológicamente estos se adaptan a condiciones más severas que otros microorganismos y su importancia está relacionada tanto con el conocimiento de las especies patógenas, como con el aprovechamiento industrial, debido a que cerca del 40% de las enzimas comercialmente disponibles se obtienen de hongos filamentosos (Cifuentes & Espinosa, 2008). Dentro de este grupo es común encontrar hongos solubilizadores de fosfatos (HSP), que mediante acción enzimática específica liberan los fosfatos capturados en la fracción mineral y lo hacen disponible para las plantas (Posada *et al.* 2012), además son un componente del suelo que puede solubilizar fósforo precipitado y otros compuestos fosfatados (Chabot, Antoun & Cescas, 1993; Chabot, 1996), ha sido reportada una mayor habilidad de solubilizar fosfatos en relación con las bacterias (Nahas, 1996), en Colombia ya se han efectuado estudios acerca de bacterias que realizan este proceso, pero los estudios sobre hongos son escasos (Vera, Pérez & Valencia, 2002a; Posada *et al.* 2012).

A través del tiempo se ha observado el incremento en el uso irracional de los insumos químicos en los sistemas de producción, lo que ocasiona un desequilibrio en los tres pilares esenciales de la sostenibilidad (ambiental, social y económico), volviendo a los agricultores dependientes de este tipo de productos. Para contrarrestar este efecto, es necesario implementar alternativas agroecológicas como biofertilizantes basados en microorganismos benéficos para los sistemas productivos, que contribuyan a mitigar el impacto ambiental, disminuir costos de producción y fertilización, permitiendo mejorar la cantidad y calidad del producto, haciéndolos más rentables, además consumen menores cantidades de energía, favorecen tanto el antagonismo como el control biológico de organismos fitopatógenos y garantizar el bienestar social de las familias y comunidades bajo una agricultura amigable con el ambiente, asegurando alimentos no tóxicos.

Teniendo en cuenta que el banano es una de las especies que se asocian tanto con los hongos formadores de micorriza arbuscular como con los hongos solubilizadores de fosfato, los

resultados del presente estudio permitirán tener un mayor conocimiento sobre la relación directa e indirecta en los sistemas de producción, de las propiedades edáficas y biológicas sobre los hongos de estudio y el contenido nutricional, debido a la necesidad de implementar métodos ecológicos, como los biofertilizantes, que permitan mejorar la calidad y cantidad de producción en los cultivos, producir estimulantes para la plantas, mitigar efectos adversos al suelo y el ambiente, y disminuir el uso de fertilizantes de síntesis química (Muñoz & Benavides, 2010).

Por lo cual, el objetivo de este estudio consiste en establecer posibles asociaciones entre los hongos formadores de micorriza arbuscular, hongos solubilizadores de fosfato, algunas propiedades edáficas con el contenido nutricional en plantas de banano, el cual es un cultivo de gran importancia tanto en Colombia como a nivel mundial. Para ello, se escogieron tres zonas Cundinamarca, Antioquia y Magdalena, donde las dos últimas son las mayores productoras de banano en Colombia. Es importante conocer esta asociación debido a que este tipo de biofertilizantes son elaborados con el fin de sustituir parcial o totalmente la fertilización sintética, disminuyendo a su vez la contaminación generada por agroquímicos y su respuesta varía considerablemente dependiendo de los microorganismos, tipo de suelo, especies de plantas, condiciones edáficas y ambientales (Bojórquez *et al.* 2010).

## 2. ANTECEDENTES.

Las plantaciones de banano (*Musa paradisiaca*) se caracterizan por extraer grandes cantidades de nutrientes del suelo, tanto de elementos mayores como menores cuyas funciones son importantes para la fisiología de la planta, lo que demanda dosis óptimas de estos elementos y adecuadas a las necesidades del cultivo (Mena, Urina, & Torres., 2009). Según Espinosa & Mite (2002), los estudios conducidos hasta fines de los 70 hacían énfasis en la nutrición de la planta sin mucha relación con el suelo, a pesar de que buscaban la respuesta a dosis de nutrientes en diferentes sustratos, ya al inicio de los 80's se empiezan trabajos de investigación que relacionan el contenido de nutrientes en el suelo con la respuesta en rendimiento del cultivo, tendencia que se ha continuado sin mayores cambios hasta el presente, solo presentándose modificaciones en la materia orgánica y sus tipos como fuente de nutrientes (Espinosa & Mite, 2002).

Según estudios realizados por Champion & Sioussaram (1970), Delvaux & Guyot (1989) se demostró el efecto positivo del aumento de la porosidad del suelo sobre el crecimiento y desarrollo de las raíces de los bananos de postre; por otra parte Robinson & Alberts (1989) reportaron que el crecimiento de las raíces es más lento a bajas temperaturas, pero el tamaño del sistema radical no es un factor determinante, por lo cual su desarrollo puede compensarse por un abundante suministro de agua, nutrientes y energía solar (Blomme, Swennen, Ortiz, & Tenkouano, 2006). Según Vaquero (2003) la textura, compactación y el drenaje son las propiedades físicas que tienen mayor influencia sobre el crecimiento y desarrollo de plantas de banano; la deficiencia de Ca durante las fases de diferenciación floral y desarrollo de los frutos de banano, induce la aparición de un desorden fisiológico (Díaz, Cayón & Mira, 2007). Análisis de suelos de la zona de Urabá han demostrado que aproximadamente el 68% de las fincas bananeras tiene una relación baja en Ca y Mg, el 26% tienen una asociación media y el 6% alta (Ospina, 2000), diversos estudios (Jurado & Vargas, 1977; Soto, 2001; Guerrero, 2004) han reportado que la capacidad de absorción de las raíces de plantas de banano presentan una relación con el sistema foliar de la planta, sin embargo, el desarrollo radical no tiene proporción con el tamaño de la planta, por lo cual se debe suplir las demandas de algunos elementos con fertilizantes minerales. Según Vallejo (1997), Jurado & Vargas (1977) afirman que los niveles freáticos presentes en la zona de Urabá y la compactación de los suelos, limitan el crecimiento normal de las raíces de banano en épocas lluviosa.

El banano como especie micorrícica de interés, se le han realizado algunos estudios entre los cuales se resaltan los de Velásquez, Osorio & Molano (2006) quienes evaluaron la incidencia de los hongos formadores de micorriza arbuscular (HMA) en un ecosistema natural y un agroecosistema bananero del Urabá, encontrando que el ecosistema natural promovía una mayor diversidad de esporas y porcentaje de asociación con los HMA. Dos años después los mismos autores, Osorio, Sánchez & Molano (2008) evaluaron la efectividad y relación de los hongos formadores de micorriza arbuscular (HMA) en el incremento en peso seco en plantas micropropagadas de banano (*Musa* AAA cv. Gran enano), utilizando diferentes tipos de inóculos entre ellos los nativos de agroecosistemas bananeros del Urabá (Antioquia-Colombia); encontrando que los hongos que favorecían la asociación eran los pertenecientes a los agroecosistemas bananeros en comparación con inóculos comerciales y ecosistemas naturales de Urabá.

Por su parte, los estudios con banano y microorganismos solubilizadores de fosfatos son escasos. Khan *et al.* (2010) realizaron una revisión en cuanto a los mecanismos de solubilización de fosfato, el desarrollo y el modo de aplicación de inoculantes fúngicos y los mecanismos de promoción del crecimiento de hongos solubilizadores de fosfatos para la productividad de los cultivos en una amplia gama de ecosistemas agrícolas, encontrando que existe un gran potencial de su uso pero requiere de esfuerzos investigativos amplios. El único trabajo presente en literatura referente a microorganismos solubilizadores de fosfatos en banano corresponde al trabajo de Reyes (1995), en el cual utilizando micorrizas arbusculares y una bacteria solubilizadora de fosfatos, demostró que su efecto combinado manifestaba los mejores resultados en cuanto a valores de peso fresco de las plantas.

Así como las plantas de banano, estos microorganismos también son afectados por su entorno físico-químico. Según varios estudios se ha demostrado que existe evidencia de la influencia positiva de la materia orgánica en el crecimiento y la riqueza de especies fúngicas (Dix & Webster, 1995; Girvan *et al.* 2004), pero también se ha mostrado una relación negativa con la abundancia de hongos solubilizadores de fosfatos (Narsian & Patel, 2009); así mismo el fósforo disponible (P) suele ser limitante del crecimiento en sistemas edáficos ácidos, debido a su inmovilización mineral con el hierro y aluminio contenidos en la fracción arcillosa (Hinsinger, 2001).

Algunos parámetros edáficos como: los contenidos de arena y arcilla (Zhang *et al.* 2007), el pH (Bååth, 1996; Aciego & Brookes, 2009) y el carbono orgánico (Huang, Wang & Chiu, 2005; Vaidya *et al.* 2008) han mostrado una fuerte influencia directamente proporcional en las poblaciones microbianas, sin embargo, en otros trabajos no se han encontrado respuestas positivas (Cabello *et al.* 2005); como lo muestra en su estudio de Posada *et al.* (2012) en el cual los hongos solubilizadores de fosfatos (HSP) tienen una relación negativa con el carbono orgánico, debido a un bajo potencial de los HSP para solubilizar los complejos fosfatados orgánicos, por lo cual, es importante conocer y evaluar las interacciones entre algunos factores edáficos y biológicos con los aislamientos de HSP y de hongos de micorriza arbuscular (HMA), las cuales en algunas investigaciones han mostrado una respuesta sinérgica, promoviendo el crecimiento de las plantas gracias al mejor aprovechamiento del P (Osorio & Habte, 2001; Zhang *et al.* 2011).

### 3. ESTADO ACTUAL DEL PROBLEMA

El banano toma más nutrientes por hectárea que cualquier otro cultivo comercialmente importante, en una plantación de rendimiento promedio se cosechan 50 ton de fruta/ha/año y en plantaciones de alta productividad este valor puede alcanzar 70 ton/ha/año, considerando la alta concentración de minerales en el racimo este último valor puede remover en la fruta 400, 125 y 15 Kg/ha/año de potasio (K), nitrógeno (N) y fósforo (P) respectivamente, por esta razón en plantaciones bananeras del mundo se aplican dosis de P que van de 0 a 300 Kg de  $P_2O_5$ /ha/año (López & Espinosa, 1995).

En la mayoría de países donde se cultiva el banano, la aplicación de fertilizantes químicos en grandes proporciones se realiza para suplir la alta demanda de nutrientes que requiere la planta, lo cual se supone un problema ambiental grave a largo plazo debido a que los compuestos sintéticos aplicados contienen principalmente nitrógeno, una fuente importante de contaminación de suelos y aguas subterráneas (Villarreal, Medina, & Ulloa., 2012). Además, las aplicaciones de fertilizantes fosfatados de síntesis industrial son costosos y pueden llevar a la pérdida de la fertilidad del suelo mediante la reducción de la diversidad microbiana y del rendimiento de los cultivos (Gyaneshwar, James, Reddy & Ladha, 2002a). Las plantas sólo pueden utilizar menores cantidades de fertilizantes fosfatados de los que a menudo se aplican de forma continua, el resto (alrededor de 70%), se convierte rápidamente en complejos insolubles tales como fosfato de calcio, fosfato de aluminio y fosfato de hierro en el suelo (Alam & Ladha, 2004; Vassilev & Vassileva, 2003; Tao *et al.* 2008).

Es imperativo mejorar el manejo de cultivos de gran importancia que ocupan grandes extensiones, utilizando fertilizantes basados en microorganismos propios del suelo, capaces de promover el crecimiento y la productividad de la planta durante todas las fases de su desarrollo, manteniendo la fertilidad del suelo (Villarreal, Medina, & Ulloa., 2012). Los microorganismos solubilizadores de fosfatos (MSF) –entre ellos hongos y bacterias-, convierten estos fosfatos insolubles en formas disponibles para la planta a través del proceso de acidificación, quelación, reacciones de intercambio, y la producción de ácido glucónico (Chung *et al.* 2005; Gulati *et al.* 2010), a partir de material insoluble aplicado como roca fosfórica (Rao, 1992; Gyaneshwar *et al.* 2002b; Khan, Zaidi & Wani, 2007) o fuentes presentes en el suelo.

Varios ensayos relacionados con HSP de la rizósfera indican una asociación simbiótica importante especialmente en el crecimiento y aumento del rendimiento en algunos sistemas productivos como el maíz (Hameeda *et al.* 2008), Sorgo (Jisha & Alagawadi, 1996; Alagawadi & Gaur, 1992), trigo (Singh & Kapoor, 1999), soja, remolacha azucarera (Sahin, Cakmakci & Kantar, 2004), garbanzos (Akhtar & Siddiqui, 2009), cacahuete (Taurian *et al.* 2010) y cactus (Puente, Li & Bashan, 2004).

Por su parte, los HMA facilitan la absorción de nutrientes a las plantas hospederas, por esta razón estos microorganismos cumplen un rol fundamental en el funcionamiento de los agroecosistemas (Berdugo & López, 2010). La relación simbiótica que desarrollan con las plantas, permiten un complemento de la raíz de la planta en la toma de nutrientes (Colozzi-Filho & Cardoso, 2000), especialmente en la absorción de P (Smith & Read, 1997; Requena *et al.* 2007); gracias a la extensión de un micelio extra radical que llega más allá de la zona de deficiencia de la raíz (Blancof & Salas, 1997), con el fin de absorber agua y nutrientes del suelo, y se forman puentes hifales con las raíces de las plantas cercanas, como mecanismo de transferencia de nutrientes entre hospederos (Peterson, Massicote & Melville, 2004).

Estas interacciones entre microorganismos en el suelo ayudan a promover el desarrollo vegetal y la absorción de nutrientes, pero para definir el problema, primero se requiere conocer algunas de las múltiples relaciones entre los componentes edáficos. En el caso de Colombia se han registrado variaciones en la producción de banano de hasta 335 cajas de 18 Kg/ha/año de un año a otro para una misma región y de hasta 273 cajas de 18 Kg/ha/año entre regiones productoras (Sánchez, 2011) lo cual muy posiblemente este asociado con variaciones edáficas temporales.

Diferentes estudios muestran que la co-inoculación de HMA y HSF pueden aumentar la biomasa de la planta, la concentración de P de los tejidos vegetales (Piccini & Azcón, 1987; Singh & Kapoor, 1999; Osorio & Habte, 2001; Kohler *et al.* 2007), la actividad microbiana del suelo (Kohler *et al.* 2007), y modificar otras propiedades edáficas como la concentración de N y P del suelo, valores de pH, conductividad eléctrica en la rizósfera, actividades enzimáticas del suelo (Matiasa, Paganoa & Muzzi, 2009).

Sin embargo, factores como la acidez, y la concentración de materia orgánica, fósforo, nitrógeno, aluminio, cobre y zinc en el suelo, inciden positivamente sobre el buen establecimiento y

desempeño de la simbiosis, lo cual se refleja en la capacidad de colonización de hospederos y en la producción de esporas de los hongos (Sieverding, 1984; Bhatia, Sundari & Andoleya, 1996).

Las respuestas de los HMA al pH del suelo son variables (Clark *et al.* 1999a,b), pueden encontrarse respuestas positivas de algunos HMA en pH ácidos y de otros en pH alcalino; con respuestas positivas (Clark, Zobel & Zeto, 1999a,b), negativas o neutras (Guzmán-Plazola, Ferrera-Cerrato & Etchevers, 1988) al enclamiento. En general, se considera que los HMA se adaptan al pH del suelo de su origen y por ello se puede convertir en un factor fundamental para el establecimiento de los HMA (Sylvia *et al.* 1993).

Rietz & Haynes (2003) y Tripathi *et al.* (2006) reportaron que las comunidades microbianas del suelo y sus actividades, son influenciadas negativamente por la salinidad, también Giri, Kapoor & Mukerji (2003) consideran que la simbiosis entre micorriza y planta actúa como un componente clave para ayudar a las plantas frente a condiciones ambientales adversas, adicionalmente la incorporación de diferentes sales en los suelos inhibe el crecimiento de hifas con la consiguiente disminución en la colonización micorrízica de las plantas (Ruiz-Lozano & Azcón, 2000).

Por otro lado, se ha demostrado en estudios *in vitro* que la acumulación del P soluble se asocia con la disminución en el pH y la producción de ácidos orgánicos y  $H^+$  a través de la absorción  $NH_4^+$ , pero este mecanismo no es el único responsable de la solubilización de P (Chuang *et al.* 2007). Diversos estudios (Narsian & Patel, 2009; Aciego & Brookes, 2009; Wu *et al.* 2009) han demostrado que los HSP en condiciones *in vitro*, crecen en condiciones ácidas, además utilizan la acidificación como mecanismo para hacer que el fósforo esté disponible. En el estudio de Posada *et al.* (2012) se reportó que la arcilla se relacionó positivamente con el número de aislamientos de los HSP, además en cafetales colombianos la riqueza de especies y el número de aislamientos de HSP-(Fe+Ca) (hongos solubilizadores de fosfato de hierro y fosfato de calcio) se relacionaron directamente con el CO y el P disponible, solo indirectamente con el pH, mientras que en cafetales mexicanos el número de aislamientos de HSP-Fe (hongos solubilizadores de fosfato de hierro (PFe)) se relacionó directamente con el pH y el número de aislamientos de HSP-(Fe+Ca) con el P disponible. La riqueza de especies de HSP-Fe se asoció directamente con el P disponible.

Las interacciones simbióticas entre microorganismos y plantas, han sido estudiadas a través del tiempo, pero en estas poco se ha tenido en cuenta la relación e importancia de los parámetros edáficos, biológicos y foliares, además debido a la multiplicidad de factores que afectan tanto los HMA como los HSP como se muestra en los párrafos anteriores, es importante conocer cómo se presentan estas relaciones en cultivos como el banano, por lo cual la pregunta problema a resolver es ¿Cuáles son las relaciones existentes entre parámetros físico- químicos edáficos, la colonización por HMA y las poblaciones de HSP y estas a su vez con el contenido nutricional (P foliar) en el cultivo de banano?.

## **4. JUSTIFICACIÓN.**

Este trabajo se basó en el sistema productivo de banano debido a su gran importancia tanto para el mercado como para autoconsumo, siendo el tercer producto agrícola de exportación en Colombia, es por ello que los aspectos más importantes a considerar son: su producción, precios de producción e impacto ambiental, con el fin de evaluar la asociación de los HMA y HSP con algunos parámetros edáficos y biológicos que permitan dar a conocer la importancia y beneficios que se obtienen al crear un biofertilizante basado en microorganismos benéficos, teniendo un equilibrio dinámico entre los tres pilares esenciales (ambiental, social y económico) en pro de la sostenibilidad, que contribuya a disminuir el impacto ambiental, bajar costos de producción y la conservación de la biodiversidad.

### **4.1 Precios de producción**

Colombia es el tercer productor mundial de plátano y banano con 2,7 millones de toneladas anuales; sin embargo, esta cifra es baja si se tiene en cuenta que la producción mundial es de 27 millones de toneladas y que los países africanos producen cerca de 19 millones de toneladas por año (Martínez, Becerra, & Villamil, 1997).

Con base en los datos 1996-2007 el DANE ha establecido un promedio del precio implícito del banano en los departamentos de mayor producción de este sistema productivo que son Antioquia y Magdalena, además según Hoz (2008) el Banco Agrario -Gerencia Banca Agropecuaria en ese año, se plantearon los principales costos en cuanto a la producción de banano en Magdalena, obteniendo los datos presentes en la Tabla 1.

Tabla 1. Costos, precios y producción del banano en el Magdalena, 2008. Fuente: Banco Agrario - Gerencia Banca Agropecuaria (Hoz, 2008).

<b>ACTIVIDADES</b>	<b>VALORES</b>
Costos directos (Ha)	\$ 11.757.294
Costos indirectos (Ha)	\$ 3.807.229
Costos totales (Ha)	\$ 15.564.523
Precio promedio Ton.	\$ 682.000
Producción prom. Ton./Ha	20,0
Punto equilibrio Ton/Ha	22,8
Costo Tonelada	\$ 778.226

Debido al inadecuado incremento del uso de fertilizantes químicos, a la presencia de deficiencias nutricionales o plagas y al precio del combustible diésel para el bombeo de agua, los productores se han visto afectados en cuanto al aumento de los costos en la producción (Rivas & Rosales, 2003), además muchos de los insumos químicos son demasiado caros para los pequeños productores, afectando tanto la calidad como la cantidad del sistema productivo en muchos países, debido a que los cultivos no cuentan con una resistencia natural a las enfermedades, resistencia al almacenamiento, disminución de ciertos componentes en el tejido vegetal, aumento de la acidez, contaminación tanto del ambiente como del suelo. El persistente uso indiscriminado de insumos químicos además del impacto ambiental ocasionado, ha sido desalentado debido a sus efectos tóxicos sobre organismos no objetivos y a los cambios indeseables que causan en el medio ambiente (Abdel-Fattaha, El-Haddadb, Hafezc, & Rashadd, 2011); por lo cual se debe tener una visión más holística que permita implementar insumos biológicos o menos contaminantes que mejoren el estado tanto del sistema de producción como del ambiente.

El mercado actual está demandando alimentos producidos por medio de tecnologías no contaminantes y que posean la certificación de sello verde (Cadena, 2009). Donde es de gran importancia los parámetros edáficos, debido a que contribuyen en el desarrollo, funcionamiento, fertilidad y estado nutricional del banano, debido a que la variación de estos afectan ciertos grupos de organismos, en el caso de los microorganismos: los HMA y HSP los cuales facilitan la captación y transporte de nutrientes a las plantas especialmente de P, por lo cual, es esencial conocer y determinar los posibles vínculos que interactúan ya sea directa o indirectamente entre

los diferentes propiedades edáficas, las poblaciones y funcionamiento de organismos benéficos para los sistemas de producción, donde el cultivo de banano no es la excepción.

Los biofertilizantes, pueden ser una ayuda para los agricultores, debido a que su utilización surge como resultado de la amplia demanda de materia prima para los procesos productivos y abastecimiento de alimentos, además favorecen el crecimiento de frutos sanos (Muñoz & Benavides, 2010), brindan rendimientos en las cosechas en cuanto a la cantidad y calidad en las plantaciones de banano para que sean más rentables, permitiendo una producción a bajo costo, que proteja a su vez el ambiente, haciendo que sea posible la expansión del cultivo en suelos recuperados luego de una sequía, grandes cantidades de sal, y algunos patógenos, para lograr una mayor sostenibilidad en los agroecosistemas; por tal motivo se ha observado a través del tiempo una disminución de los fertilizantes convencionales, mediante la disponibilidad y aplicación tanto de macro como micro elementos, siendo una alternativa para disminuir el impacto ambiental y económico, tanto para grandes productores como para pequeños productores, con el fin de implementar mecanismos agroecológicos, debido a que permiten una producción a bajo costo y conservación de la biodiversidad (Ezz, Aly.Saad & El-Shaieb, 2011).

Allí juegan un papel muy importante los HMA y HSP, los cuales presentan una relación simbiótica con los sistemas productivos, contribuyendo a su óptimo desarrollo, crecimiento y una producción amigable con el ambiente, bajo una visión holística que permita obtener un equilibrio dinámico entre los tres pilares esenciales (ambiental, social y económico); además esto baja los precios de producción de los cultivos, permitiendo que sea rentable, mejora la productividad por área cultivada en corto tiempo, mitiga la contaminación en suelos y agua, debido a que se suplen los fertilizantes de síntesis química y se conserva la biodiversidad (Ezz *et al.* 2011)

## **4.2 Impacto ambiental**

El incremento de las malas prácticas agrícolas por medio de la aplicación de fertilizantes de síntesis química ha ocasionado un importante daño a la calidad ambiental en todo el mundo, debido a que el manejo convencional de los cultivos ha limitado los conocimientos o saberes ancestrales, mecanismos de manejo, biofertilizantes, implementación de microorganismos y sus beneficios hacia la planta y suelo, por lo cual es recomendable establecer policultivos con sistemas agroecológicos (Altieri & Nicholls, 2000).

Se hace necesario mejorar la eficiencia en la producción a través de la profundización en el conocimiento del sistema productivo, implementación de prácticas culturales adecuadas, disminución en la aplicación de pesticidas, fertilizantes edáficos, foliares y reducción en costos; por lo cual es necesario estudiar e implementar tecnologías como la aplicación de microorganismos benéficos con el fin de incrementar la disponibilidad de nutrientes y reducir los impactos negativos del manejo convencional (Molina, 2009).

A nivel mundial el cultivo del banano es extremadamente importante debido a que se presenta como monocultivo y en sistemas mixtos, por lo cual la variabilidad de suelos debe ser considerando en un proceso de transición ecológica que proponga lineamientos con fundamento científico para manejar los suelos dedicados al cultivo del banano en forma sostenible y ambientalmente amigable (Molina, 2009). Este sistema productivo se caracteriza por extraer grandes cantidades de nutrientes, para la fisiología de la planta, por lo cual es necesario realizar un eficiente manejo del suelo y del agroecosistema con buenas prácticas agrícolas que permitan asegurar las dosis óptimas de nutrientes, conservar la biodiversidad y diferentes microorganismos benéficos que presenten una asociación simbiótica con el cultivo, como los del presente estudio (HMA y HSP) y una producción más sostenible amigable con el ambiente; además se debe tener presente muchas de las asociaciones posibles entre los parámetros físicos, biológicos y químicos en el sistema para tener un equilibrio dinámico entre el efecto de todas y cada una de las variables.

#### **4.3 Inocuidad y soberanía alimentaria**

La inocuidad alimentaria se refiere a la producción de alimentos sanos o limpios desde el punto de vista microbiológico, sin dejar de lado los aspectos de contaminación química y física, la seguridad y soberanía alimentaria son aspectos esenciales en todo país, debido al establecimiento y distribución del alimento tanto de importaciones como exportaciones; por lo cual se debe garantizar un óptimo control sanitario de los productos que contribuyan a una mejor calidad de estos (Mena, Urina, & Torres., 2009).

En muchos países en desarrollo, la mayoría de la producción de banano se destina al autoconsumo o se comercia localmente, desempeñando así una función esencial en la seguridad

alimentaria, América Latina lidera la economía mundial del banano no sólo por su proporción del comercio mundial, sino también por su mayor capacidad de respuesta ante las condiciones cambiantes del mercado en comparación con otras regiones (Arias, Dankers, Liu, & Pilkauskas, 2004).

Estos aspectos son de gran importancia para garantizar un mejoramiento en la calidad de vida de las personas, debido a que se obtienen alimentos libres de tóxicos y una disminución en el impacto socio-ambiental que se ha presentado a través del tiempo, por ello en este trabajo se quiere demostrar la importancia de conocer las asociaciones entre los microorganismos benéficos, algunas propiedades edáficas y el contenido nutricional, como una herramienta de producción sostenible. Cada comunidad tiene el derecho a una producción sostenible basada en alimentos nutritivos y ecológicos, para poder vender sus productos a nivel local, nacional y mundial, por lo cual es importante recordar e implementar en los sistemas productivos la conservación la biodiversidad y semillas, además procesos agroecológicos como la implementación de hongos benéficos para el cultivo, para lo cual se debe tener en cuenta las relaciones entre todos los factores que influyen de manera directa o indirecta sobre cada sistema de producción.

Esta investigación hace parte de un proyecto para el desarrollo de un inoculo mixto específico para banano, el cual tiene como principio activo microorganismos simbióticos como los hongos formadores de micorriza arbuscular y los hongos solubilizadores de fosfato, para ello se hace necesario el aislamiento e identificación de estos microorganismos, junto con un análisis tanto a nivel foliar como de suelos, que permitan establecer en primera instancia los factores que pueden influir sobre el contenido nutricional en plantas de banano, además detallar las posibles asociaciones entre los HMA, HSP, parámetros edáficos- biológicos y contenido nutricional. Por lo cual el presente estudio contribuye a la fase inicial del desarrollo de dicho inoculo.

## **5. OBJETIVOS.**

### **5.1 Objetivo General**

Determinar la asociación entre algunos parámetros físico- químicos y biológicos de suelo con el contenido nutricional (P foliar) en plantas de banano.

### **5.2 Objetivos específicos.**

- ✓ Determinar los posibles factores edáficos que pueden estar relacionados con el contenido nutricional (P foliar) de las plantas de banano.
  
- ✓ Establecer las posibles asociaciones entre hongos formadores de micorriza arbuscular, hongos solubilizadores de fosfato y propiedades edáficas del suelo en cultivos de banano.

## 6. MARCO TEÓRICO.

### 6.1 Hongos formadores de micorriza arbuscular (HMA)

La simbiosis micorriza arbuscular (MA) es una asociación mutualista formada entre plantas y hongos, donde ambas partes tienen ventajas, los hongos MA obtienen fotosintatos, mientras que la planta obtiene nutrientes como fosfato inorgánico a través de las hifas (Osorio, Sánchez, & Molano, 2008). Los miembros de más de 80% de las familias de plantas vasculares son capaces de formar la simbiosis MA (Abdel-Fattaha *et al.* 2011), brindando ventajas de nutrición y de resistencia a estrés ejercido por factores bióticos y abióticos (Velásquez, Osorio, & Molano, 2006).

Según Smith & Read (2008) las micorrizas arbusculares, simbioses mutualistas endofíticas y biotróficas, han sido ampliamente descritas como favorecedoras del crecimiento. Sin embargo, se ha demostrado que las perturbaciones realizadas a un ecosistema, desde el punto de vista del acondicionamiento agronómico de un cultivo, generan cambios en la actividad micorrizal, ya que la colonización y la diversidad de individuos (Velásquez, Osorio, & Molano, 2006).

Los hongos micorrícicos arbusculares (HMA) pueden formar una asociación simbiótica con la mayoría de las especies de plantas y mejorar la eficiencia de las plantas asociadas al asimilar P de la solución del suelo (Manjunath, Hue & Habte, 1989; Habte & Osorio, 2001). Rodríguez & Fraga (1999) sugirieron que algunas rizobacterias pueden liberar iones fosfato  $P_i$  de fuentes de fósforo (P) insolubles y el P liberado al ser tomado del micelio de las micorrizas arbusculares porque las rizobacterias y los HSP no pueden transferir P a las raíces, ni las micorrizas pueden solubilizar el P.

Para obtener el máximo beneficio para el crecimiento de las plantas, es necesario seleccionar la combinación adecuada de las especies de hongos micorrícicos arbusculares y microorganismos solubilizadores de fósforo para ser inoculados en suelos, sin embargo, se necesitan más investigaciones para comprender los mecanismos subyacentes (Zhang, Wu, Li, & Qin, 2011).

## **6.2 Hongos solubilizadores de fosfatos (HSP)**

Dentro del grupo de hongos microscópicos filamentosos es común encontrar hongos solubilizadores de fosfatos (HSP), que mediante acción enzimática específica liberan los fosfatos capturados en la fracción mineral y lo hacen disponible para las plantas (Posada, Prager, Sieverding, Dorantes, & Abarca, 2012).

Algunos microorganismos no solo tienen capacidad solubilizadora de fosfatos, sino a su vez promueven el crecimiento vegetal mediante la producción y liberación de fitohormonas como el ácido indolacético (AIA), por ejemplo los microorganismos solubilizadores de fosfatos presentes en la rizósfera de paramos no solo juegan un papel fundamental en la nutrición de las plantas, sino que también intervienen en su desarrollo; la asociación de estos con la rizósfera de las plantas contribuye a que suplan las necesidades de P en un ecosistema, además de ofrecer un banco de germoplasma microbiano importante con perspectivas para la utilización agrícola, para implementar estrategias de fertilización biológica para los cultivos con disminución de costos en fertilizantes (Sánchez, Valencia, & Valero, 2005).

Los microorganismos solubilizadores de fosfato juegan un papel importante como complemento de fósforo para las plantas, lo que permite un uso sostenible de los fertilizantes fosfatados, estos microorganismos están implicados en una amplia gama de procesos que afectan a la transformación de fósforo (P) en el suelo y por lo tanto son componente integral de ciclo del P (Pradhan & Sukla, 2005). Además hacen parte importante de la comunidad microbiana que tiene como beneficios el crecimiento y desarrollo de plantas (Rinu & Pandey, 2011). Nahas (1996) estudio 42 aislamientos de suelo (31 bacterias- 11 hongos), debido a su capacidad para solubilizar fosfato de roca y fosfato de calcio en medio de cultivo, donde se encontró que los hongos poseen una mayor capacidad para solubilizar fosfato insoluble que las bacterias. En la rizósfera es donde generalmente existe una mayor proporción de microorganismos solubilizadores de fosfatos, debido a que los exudados radicales y detritos vegetales, proveen el sustrato energético para soportar la intensa actividad microbiológica y para llevar a cabo la solubilización (Curl & Truelove, 1986). Los hongos y bacterias tienen la habilidad de solubilizar fosfatos en formas inorgánicas para poder alimentarse de esas fuentes de P no disponibles,

aunque varios mecanismos pueden estar involucrados, el principal de ellos ocurre a través de la producción de ácidos orgánicos (Vera, Pérez, & Valencia, 2002).

El fósforo orgánico puede ser mineralizado mediante la acción de enzimas específicas que son reguladas por la demanda de este nutriente (Picone & Zamuner, 2002), el cual se encuentra mediado por enzimas fosfatasas que pueden ser sintetizadas por las raíces de la planta produciendo fosfatasas ácidas, como por hongos y bacterias que producen fosfatasas ácidas y alcalinas (Rigde & Rovira, 1971). Por otro lado, algunos de los compuestos orgánicos del P que comúnmente se pueden encontrar en suelos son la lecitina, ácidos nucleicos y fitina, los cuales en presencia de Ca y N asimilable para los microorganismos pueden ser degradados por este tipo de enzimas liberando fósforo en forma de fosfatos (Alexander, 1987).

Otro mecanismo para la solubilización de fósforo es por medio de la inmovilización, la cual se da cuando las formas disponibles de fósforo (P) son consumidas por microorganismos, convirtiéndose en P orgánico en biomasa; por otro lado, se encuentra la oxidación-reducción del P, por la cual los microorganismos utilizan el fosfito y lo transforman dentro de la célula en fosfato (Henaó & Vanegas, 2008).

### **6.3 Contenido nutricional en banano (potasio, fósforo, nitrógeno, azufre)**

La nutrición es un aspecto muy importante en el manejo del banano, por lo cual la fertilización del banano juega un papel importante en el manejo del cultivo, ya que logra una buena nutrición que contribuye a que el racimo reúna las mejores características, calidad y peso (López & Espinosa, 1995). Tradicionalmente el manejo de la nutrición se ha basado en el promedio del contenido de nutrientes medido por el análisis de suelo, este método de diagnóstico trata de definir el manejo nutricional sobre la variabilidad intrínseca del suelo. Otro método es por sitio específico el cual busca identificar y cuantificar la variabilidad en el rendimiento y su efecto, determinando estrategias de mejora para incrementar los rendimientos, rentabilidad y reducir el potencial impacto ambiental (Espinosa & Mite., 2002).

En cultivos perennes como el banano, se presentan comúnmente antagonismos y sinergismos entre nutrientes que a menudo tienen efectos sobre el rendimiento, la relación antagónica más estudiada es la existente entre K, Ca y Mg (Lahav & Turner, 1992). Cuando el contenido de

alguno de estos nutrientes es muy alto se reducen los contenidos de los otros y esta condición provoca problemas en el crecimiento y rendimiento de la planta; se considera que existe un adecuado equilibrio cuando los valores de la relación caen dentro de una zona de equilibrio que se obtiene uniendo los rangos de variación del contenido foliar de cada nutriente considerados adecuados (Espinosa & Mite., 2002).

La asociación entre el HMA y las plantas puede ser directa o indirecta, y se cree que es especialmente eficaz en suelos con deficiencia en nutrientes (en particular P) (Akinrinde, 2006), la inoculación de plantas con hongos micorrizógenos provoca un incremento en los procesos de absorción y traslocación de nutrientes como N, P, K, Ca, Mg, S, Zn, Cu, Mo, Fe, Mn, entre otros (Smith & Read, 2008). Los microorganismos solubilizadores de fosfato están involucrados en un amplio rango de procesos que afectan la transformación del fósforo, siendo componentes integrales del ciclo edáfico de este nutriente (Fankem *et al.* 2006), movilizan fosfato inorgánico desde la matriz mineral hasta la planta donde puede ser absorbido por las raíces, a su vez las plantas les suministran carbonatos que son metabolizados para el desarrollo de estos microorganismos (Pérez *et al.* 2007), en el grupo de solubilizadores se puede encontrar los hongos como importantes componentes de la biota del suelo, su abundancia depende de la profundidad del suelo y de las condiciones nutricionales (Chakraborty *et al.* 2010).

La mayoría de los nutrientes esenciales de las plantas, especialmente el fósforo (P) y potasio (K) se producen en formas complejas en el suelo y en proporciones que pueden ser transformados en estados que relativamente no se encuentran disponibles para las plantas, la mayoría de los suelos en la zona tropical son ácidos (pH <5,5), tienen una alta concentración de aluminio (Al), hierro (Fe) y los bajos niveles de iones de manganeso (Mn) que fijan fácilmente elementos nutrientes en los suelos (Akinrinde, 2006). Hay factores de que limitan el crecimiento y rendimiento del cultivo, así como la productividad del suelo en los que son altamente meteorizados en las regiones húmedas y subhúmedas del mundo debido a la deficiencia de elementos nutritivos esenciales (Akinrinde *et al.* 2005); con respecto a esto, Akinrinde & Okeleye (2005) mencionan que los cultivos en zonas tropicales se han vuelto tan caros para producir que las deficiencias de nutrientes se deben tratar para no permitir que limiten sus rendimientos.

## **6.4 Propiedades edáficas en el cultivo de banano**

Los suelos aptos para el desarrollo del cultivo de banano son aquellos que presentan una textura: franco arenosa, franco arcillosa, franco arcillo limosa o franco limosa. Además deben poseer un buen drenaje interno y alta fertilidad, su profundidad debe ser de 1,2 a 1,5 mts, por otro lado deben poseer buenas propiedades de retención de agua, los suelos arcillosos con un 40% de retención de agua, no son recomendables para el cultivo y el pH del suelo ideal es de 6,5; pudiendo tolerar pH de 5,5 hasta 7,5 (Mena, Urina, & Torres., 2009).

La mayor actividad de los microorganismos se realiza desde la superficie del suelo hasta unos 20 cm de profundidad, las colonias de microorganismos permanecen adheridas a las partículas de arcilla y humus (fracción coloidal) y a las raíces de las plantas que les suministran sustancias orgánicas que les sirven de alimento y estimulan su reproducción, la colonización de algunos grupos microbianos sobre las fracciones orgánicas e inorgánicas, dependen de la función que se esté cumpliendo en la transformación (Molina, 2009).

## **6.5 Banano (variedades, fenología, condiciones ideales para su conocimiento, monocultivos y policultivos)**

### **6.5.1 Generalidades**

El banano se cultiva en todas las regiones tropicales y tiene una importancia fundamental para las economías de muchos países en desarrollo, en términos de valor bruto de producción, es el cuarto cultivo alimentario más importante del mundo, después del arroz, el trigo y el maíz, además de que es un alimento básico y un producto de exportación para Colombia (Arias, Dankers, Liu, & Pilkauskas, 2004).

El cultivo de banano y sus industrias colaterales, generan empleo para más de un millón de familias, esto representa alrededor de 2,5 millones de personas que dependen de una u otra forma de la industria bananera (Abdel-Fattaha *et al.* 2011). Las variedades cultivadas de banano tienen una distribución altitudinal, las más comunes son: Hartón (0 - 1000 metros), Dominico-Hartón (1000 - 1500 metros) y Dominico (1500 metros en adelante) (Martínez, Becerra, & Villamil, 1997). En este sistema de producción se utilizan abonos orgánicos tales como gallinaza,

lombricompostos, compost, bovinaza y abonos verdes como leguminosas herbáceas (Mena, Urina, & Torres., 2009).

Como producto de exportación, el banano contribuye de forma decisiva a las economías de muchos países de bajos ingresos y con déficit de alimentos, entre los que figuran Ecuador, Honduras, Guatemala, Camerún, Costa de Marfil y Filipinas. Es la fruta fresca más exportada del mundo en cuanto a volumen y valor (Arias, Dankers, Liu, & Pilkauskas, 2004). La producción de banano para la exportación se considera una actividad tecnológica y económica diferente a la producción del banano como alimento de primera necesidad, además de que se sirve únicamente de unas cuantas variedades seleccionadas por su alto rendimiento, su durabilidad en el transporte de larga distancia y su calidad (Arias *et al.* 2004), encontrando así entre las variedades más importantes de banano: Gross Michel, Valery, Gran Enano y William´s (Anacafé, 2004).

### **6.5.2 Fenología y tiempo de crecimiento**

En el cultivo de banano se debe considerar que el desarrollo de una planta adulta, conocida como la madre, va ligada al desarrollo de las plantas jóvenes, considerados como los hijuelos. En la siguiente Tabla 2 podemos observar las fases fenológicas de las plantas de banano, para un óptimo crecimiento y desarrollo (Ortega, 2009):

Tabla 2. Fases fenológicas del banano, fuente Soto (1998).

<b>FASES</b>	<b>ESTADOS DE DESARROLLO</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
Fase Infantil	Yema (Fase Inicial)	Desarrollo de un meristema lateral del rizoma
	F <sub>10</sub>	Primera hoja con un mínimo de 10 cm de ancho
	F <sub>m</sub>	Primera hoja con relación foliar mínima
Fase Juvenil	DF	Diferenciación foliar
	IF	Iniciación floral
	F	Floración
Fase Reproductiva	C	Cosecha

El crecimiento y producción del banano depende del desarrollo progresivo de las hojas (Figura 1), las cuales deben mantenerse funcionales desde la emisión floral y durante el desarrollo de los frutos (Acosta & Salinas, 2011), en Urabá durante la fase vegetativa, la planta emite 35 o 36 hojas, con una frecuencia de una hoja/semana en época de lluvias y entre 0,4 y 0,6 hoja/semana en condiciones de sequía (Mira, Díaz & Hernández, 2004); en total, la planta puede producir de 30 a 50 o más hojas en el ciclo de cultivo, pero en un mismo tiempo sólo mantiene de 10 a 14 hojas fotosintéticamente activas (Turner *et al.* 2007).

En el sistema de producción del banano es importante considerar que tanto en la productividad como en el rendimiento, en cada etapa del ciclo fenológico, existen dos factores que lo afectan, estos son: internos (entre los que se considera la genética de las plantas y las variedades utilizadas) y los factores externos que incluyen los ambientales, agentes bióticos, tipo de suelo y la intervención del hombre (Toledo & Aguilar, 1997). Estos factores son importantes en cada fase vegetativa para el óptimo crecimiento de las plantas de banano, además permite tener un equilibrio dinámico sostenible en el sistema, conservando los recursos y la biodiversidad.

Según Soto (2002), una plantación establecida es la secuencia de plantas en diferentes estados de desarrollo, en unidades de producción que interactúan entre sí, se coloca con base en un “retorno” o hijo de sucesión, que se inicia a los 168 días del inicio de su planta madre (Figura 2), creando una secuencia de plantas que simulen el desarrollo real de una población, es importante tener en cuenta la duración aproximada de los estados fenológicos del sistema de producción de banano, como se muestran en la Tabla 3 (Gamboa, 2002):

Tabla 3. Duración y tiempo acumulado promedio en los estados fenológicos en el banano (Gamboa, 2002).

<b>FASE</b>	<b>DURACIÓN PROMEDIO DE LA FASE (DÍAS)</b>	<b>TIEMPO ACUMULADO, PROMEDIO (DÍAS)</b>
Fase inicial a F <sub>10</sub>	104	104
Fase F <sub>10</sub> a F <sub>m</sub>	91	195
Fase F <sub>m</sub> a Floración	125	320
Floración a Cosecha	84	404

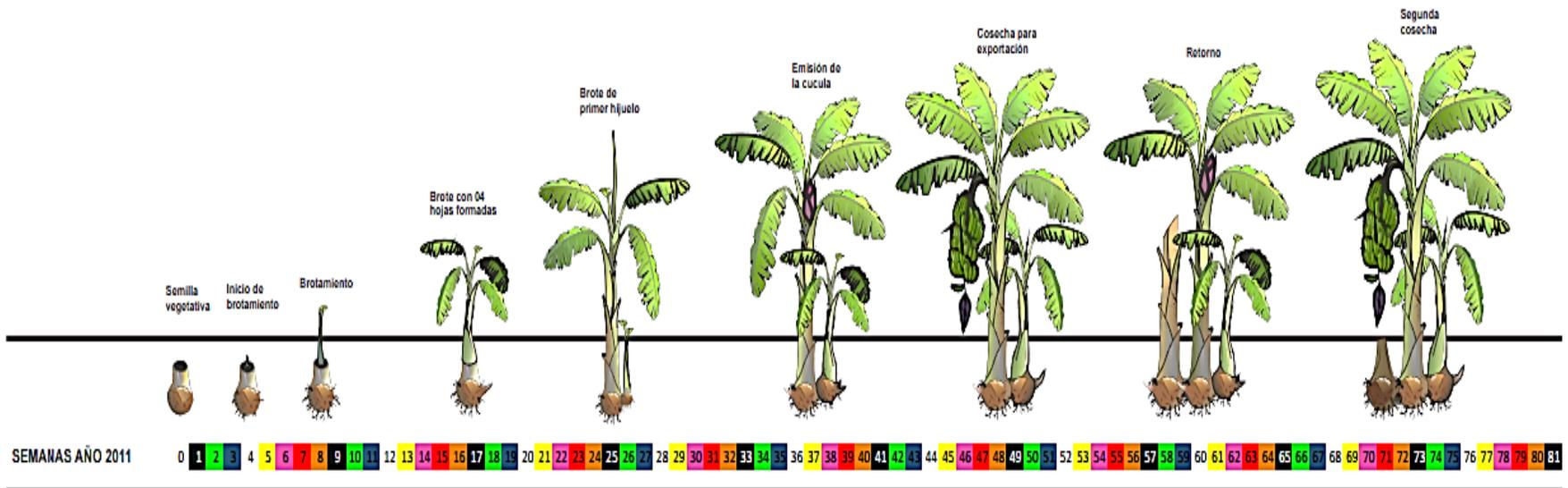


Figura 1. Fases del proceso de desarrollo del cultivo de banana Torres (2012).

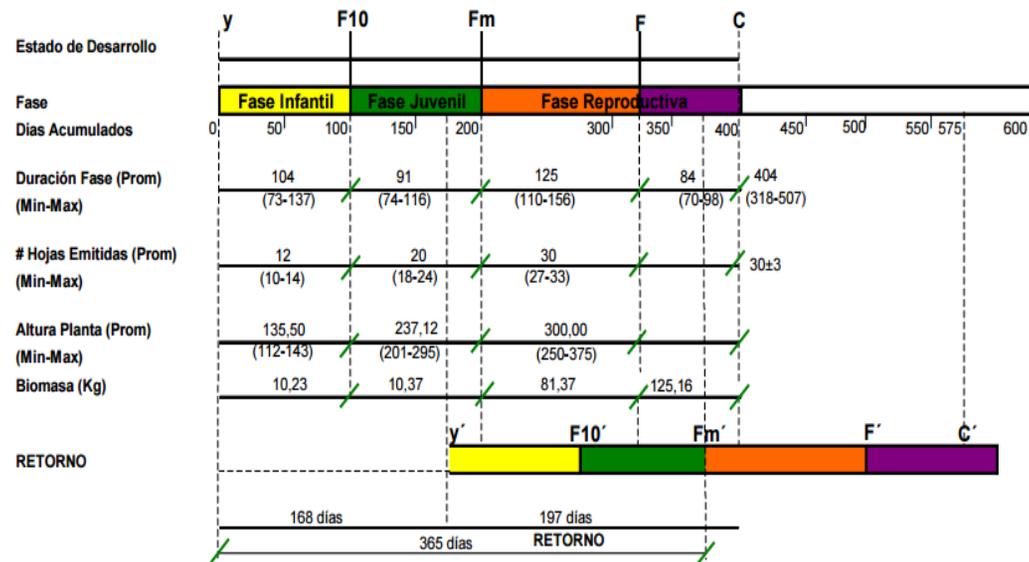


Figura 2. Representación esquemática de la curva de crecimiento de una planta de banana y su "retorno" o hijo (Soto, 2002).

### 6.5.3 Fertilización

En plantaciones adultas se considera que existe una adecuada cantidad de raíces en un anillo que se localiza de 30 hasta 60 cm de distancia de la planta, por lo es recomendable fertilizar frente al hijo de sucesión en una semiluna de un ancho de 30 cm, la fertilización está orientada hacia la nutrición del hijo y no tanto hacia la nutrición de la planta madre; el nitrógeno, el potasio y el magnesio se aplican en formas solubles y se movilizan después de la aplicación en diferentes direcciones en el suelo, también es esencial que un buen complemento de la fertilización mineral que ayuda a aprovechar el potencial de absorción de la amplia zona de exploración de raíces, es el uso de materiales orgánicos aplicados al voleo (López & Espinosa, 1995).

El principio fundamental de la fertilización en los sistemas productivos de banano es proveer a la planta los nutrimentos necesarios para el crecimiento, desarrollo y producción, teniendo en cuenta que para la aplicación de abonos se debe conocer la fertilidad del suelo y los requerimientos del cultivo (López & Espinosa, 1995), algunos de los fertilizantes utilizados en las plantaciones de banano son: la Urea, el potasio (K), elementos menores, compost QUINCOL<sup>®</sup> y NITROFOST<sup>®</sup>, de los cuales los de mayor uso según INIAP son la Urea al 46% siendo un compuesto químico provee un alto contenido de nitrógeno a la planta, el cual es esencial en el metabolismo relacionándose directamente con la cantidad de tallos y hojas, también se encuentra el muriato de potasio (Tabla 4) (Cadena, 2009).

Tabla 4. Recomendación de fertilización (INIAP) Fuente: (Cadena, 2009).

Urea 46 %	Kg	400/Ha
Muriato de potasio	Kg	700/Ha

La fertilización en un sistema productivo de banano se debe realizar de manera organizada según sus etapas, debido a que cada una requiere nutrientes en diferentes cantidades, para una eficiente aplicación de fertilizantes se debe tener en cuenta el análisis de suelo, por lo cual en Colombia se elabora de diversas maneras como (Giraldo & Pérez, 2012):

- Fertilización al momento de la siembra: Es recomendable aplicar 200g de cal triple 30, cal dolomita o cal agrícola, repartiendo esta enmienda en cada hoyo, espolvoreando las paredes y mezclar la tierra con materia orgánica (MO) bien compostada (Giraldo & Pérez, 2012).
- Fertilización en la fase de crecimiento antes de la floración: Si no se cuenta con los resultados del análisis de suelo, entre dos y tres meses aproximadamente después de la siembra, se aplica a cada planta 300 g de la siguiente mezcla: una parte de urea por tres partes de cloruro de potasio, adicionando 50 g/planta de óxido de magnesio y 20 g de boro en forma de corona (Giraldo & Pérez, 2012).
- Fertilización en la fase de producción y sostenimiento: Sin el análisis de suelo, se realizan aplicaciones de fuentes de nutrientes ricas en K, utilizando fertilizantes comerciales como: 14- 4 -23 - 4 N P K Ca, 17 – 6 – 18 - 2 N P K Mg, 14 – 2 – 25 - 26 - 7 N P K S Mg, 14 – 4 – 29 – 11 - 6 N P K S Mg, 25 – 4 – 24 N P K; se pueden encontrar en el mercado o se pueden elaborar a base de mezclas de fertilizantes como la urea, cloruro de potasio, fosfato diamónico (DAP), algunas fuentes específicas de magnesio, azufre y boro. La aplicación se realiza entre dos y tres veces por año suministrando 200 - 300g por planta y por aplicación, espolvoreándolo en el plato de la planta y alrededor de los hijuelos en media luna, retirado 30 cm de la base del pseudotallo (Giraldo & Pérez, 2012).
- Fertilización orgánica: Una vez establecido el cultivo se aplica cada 3 o 4 meses un kilo de materia orgánica bien compostada por planta, lo cual garantiza tanto el buen desarrollo de la plantación como óptimos rendimientos en producción, al suministrar el fertilizante químico se puede cubrir con MO para incrementar su efectividad, en tanto se mejore la actividad microbiológica del suelo y asimilación de nutrientes (Giraldo & Pérez, 2012).

La fertilización es una de las actividades más importantes en el cultivo de banano, ya que de una nutrición adecuada depende, que la fruta cumpla los calibres y calidades de los

mercados internacionales, en la región de Urabá, el 97,9% de fincas aplican fertilizantes químicos donde diversos factores como: lixiviación, escorrentía y evaporación, ocasionan que parte de los fertilizantes no sean aprovechados en la nutrición del sistema productivo (Osorio *et al.* 2008).

#### 6.5.4 Aspectos económicos

El volumen de bananos exportados a nivel mundial en el período de 1985 a 2002 creció a una tasa media sin precedentes del 5,3% anual, el doble que en los últimos 24 años (Arias, Dankers, Liu, & Pilkauskas, 2004).

El banano en Colombia es después del café y las flores, el tercer producto agrícola de exportación en importancia, los cultivos de banano en Colombia ocupan aproximadamente 60.000 hectáreas (7 % de la superficie total plantada de cultivos frutícolas); cerca del 16% de la superficie plantada de bananos es banano criollo, la producción se concentra en Antioquía y Magdalena, que son zonas de conflicto. Antioquía abarca casi el 70 % de la superficie plantada de banano y la mayoría de los plátanos para exportación, por medio de un estudio realizado por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural en 1992 y 2007 en estos dos departamentos se hizo una comparación para detallar su crecimiento como se observa en la Tabla 5 (Arias *et al.* 2004).

Tabla 5. Producción de banano, superficie cosechada y rendimientos en Antioquía y Magdalena, 1992 y 2001. Fuente: Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, Colombia. (Arias, Dankers, Liu, & Pilkauskas, 2004).

	1992			2001		
	Producción	Superf.	Rendimiento	Producción	Superf.	Rendimiento
	(t)	(ha)	(t/ha )	(t)	(ha)	(t/ha )
Antioquia	1'089.120	27.573	39,5	1'142.463	29.927	38,1
Magdalena	540.280	13.507	40,0	457.607	13.459	33,4
Total	1'629.400	41.043	39,7	1'600.070	43.385	36,8

## 7. MÉTODOS

### 7.1 Selección de sitios de muestreo

Se realizaron muestreos en los departamentos de Cundinamarca (Z1), Antioquia (Z2) y Magdalena (Z3). La primera zona se encuentra ubicada en el centro del país que corresponde a la cordillera central y su clima es cálido y templado, aproximadamente de 20°C, en esta zona se observan policultivos a 1317 m.s.n.m. La segunda zona se encuentra localizada al noroeste del país, por donde pasan las cordilleras Central y Oriental, esta zona es reconocida por su alta producción de banano en cultivo convencional a 29 m.s.n.m, además tiene un clima tropical seco y templado, con una temperatura media de 23°C. Por último, la zona 3, correspondiente al departamento Magdalena, que se encuentra ubicado al norte del país, su clima es seco con una temperatura media de 29°C, allí se observan monocultivos de banano a 30 m.s.n.m, debido a que esta zona también es reconocida por su alta producción de banano de manera convencional.

En cada zona se seleccionaron 4 fincas (separadas al menos 20 Km), en cada finca 6 plantas, las cuales se encontraban separadas una distancia de por lo menos 100 m. La Figura 3, muestra la localización de las 4 fincas muestreadas en la zona 1, ubicadas en los municipios de La Vega y Albán –Cundinamarca, en la Tabla 6 se encuentran las características de cada una de ellas.

Tabla 6. Características geográficas de las fincas de la zona 1- Cundinamarca.

MUNICIPIO	NOMBRE FINCAS	COORDENADAS	ALTURA
La Vega	Campo Alegre	5°01'16.0"N 74°18'18.0"O	1196 m.s.n.m
	El Recuerdo	4°58'09.3"N 74°22'07.1"O	1383,8 m.s.n.m

Albán	El Bohio, Rosas y Serafines	4°55'07.8"N 74°26'03.0"O	1579,5 m.s.n.m
	San Enrique	4°54'08.2"N 74°26'08.5"O	1661,5 m.s.n.m



Figura 3. Localización de las fincas muestreadas en Cundinamarca.

La Figura 4, muestra la localización de las 4 fincas muestreadas en la zona 2, ubicadas en Apartado y Chigorodo (Urabá Antioqueño), una de las mayores zonas productoras de banano en Colombia y en la Tabla 7 se encuentran las características de cada una de las fincas en donde se realizaron los muestreos.

Tabla 7. Características geográficas de las fincas de la zona 2- Antioquia.

<b>MUNICIPIO</b>	<b>NOMBRE FINCAS</b>	<b>COORDENADAS</b>	<b>ALTURA</b>
Apartado	Makaira	7°52'07.0"N 76°36'35.3"O	39,3 m.s.n.m
	Las Victorias	7°51'45.1"N 76°40'07.5"O	16,8 m.s.n.m
Chigorodo	Las Vegas	7°44'08.0"N 76°45'00.3"O	21,3 m.s.n.m
	Dallas	7°42'06.1"N 76°43'08.1"O	31,8 m.s.n.m

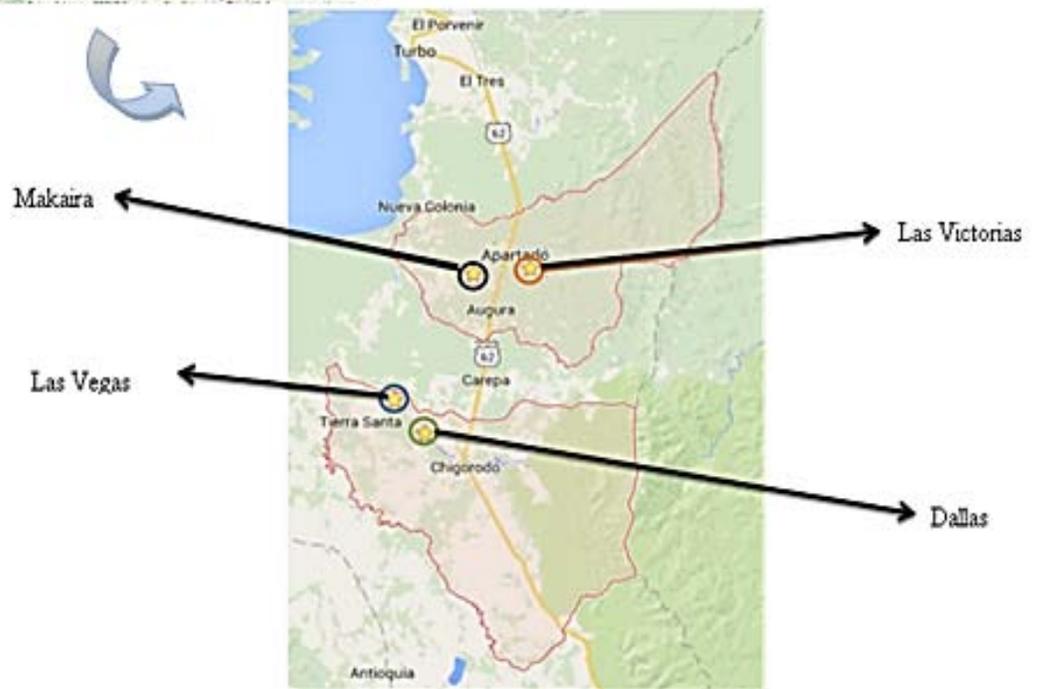
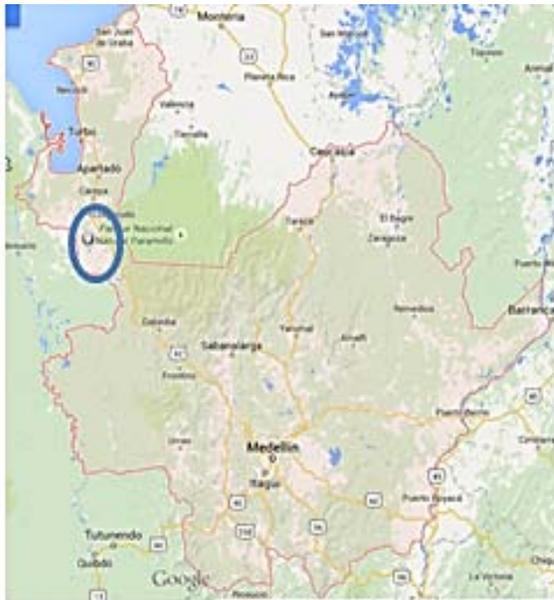


Figura 4. Localización de las fincas muestreadas en Antioquia.

En la Figura 5 se puede observar la localización de las 4 fincas muestreadas en la zona 3, correspondiente al Magdalena, otra de las mayores zonas productoras de banano en Colombia y en la Tabla 8 se encuentran las características de cada una de las fincas donde se realizaron los muestreos.

Tabla 8. Características geográficas de las fincas de la zona 3- Magdalena.

<b>NOMBRE FINCAS</b>	<b>COORDENADAS</b>	<b>ALTURA</b>
La Lorena	10°44'48.0"N 74°09'55.0"O	39,6 m.s.n.m
La Marcela	10°47'00.9"N 74°08'32.7"O	17,5 m.s.n.m
Puerto Carreño	10°54'21.0"N 74°12'09.1"O	21,3 m.s.n.m
La Eloisa	10°53'08.0"N 74°09'17.0"O	32,1 m.s.n.m

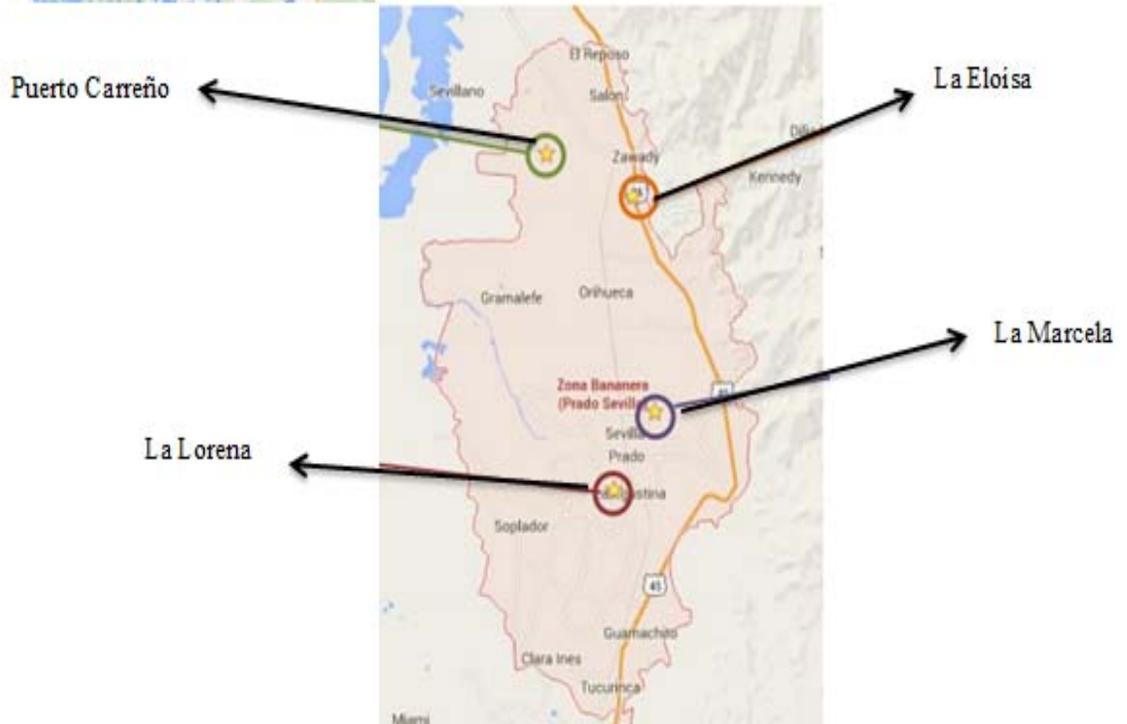


Figura 5. Localización de las fincas muestreadas en Magdalena.

## **7.2 Muestreo**

### **7.2.1 Muestreo de suelo**

El muestreo de suelo fue realizado alrededor de cada planta seleccionada, ubicando cuatro puntos de muestreo en forma de cruz, a una distancia de menos de 30 cm del fuste, donde se procedió a excavar cuidadosamente en busca de raíces terciarias y cuaternarias (donde se asocian los HMA).

Las cuatro muestras de cada planta se homogenizaron para crear una muestra compuesta de aproximadamente 1 kilo de suelo y raíces, cada bolsa se selló y etiquetó, para posteriormente ser conservada en refrigeración hasta su ingreso al laboratorio.

### **7.2.2 Muestreo foliar**

Además del muestreo de suelos, se realizó un muestreo foliar seleccionando la tercera hoja de cada planta que se encontrara fotosintéticamente activa, luego se procedió a cortar la parte media de la lámina de la hoja como lo ilustra la Figura 6, en la cual, la parte A hace referencia al largo de la hoja, A/2 muestra la parte media de la hoja donde se presenta la mayor actividad fotosintética, siendo allí donde se seleccionó la lámina de la hoja para la toma de la muestra (numeral 1).

El numeral 2 muestra la nervadura central de cada una de las hojas escogidas y B hace referencia al ancho de la parte media de la hoja, los cuales son factores importantes para la selección de una óptima longitud de las hojas para el muestreo, además del ancho del centro de la hoja se toma una franja de 10 cm aproximadamente, a ambos lados de la nervadura sin tocarla. Finalmente estas fueron empacadas en bolsas de papel debidamente etiquetadas y conservadas hasta su procesamiento final.

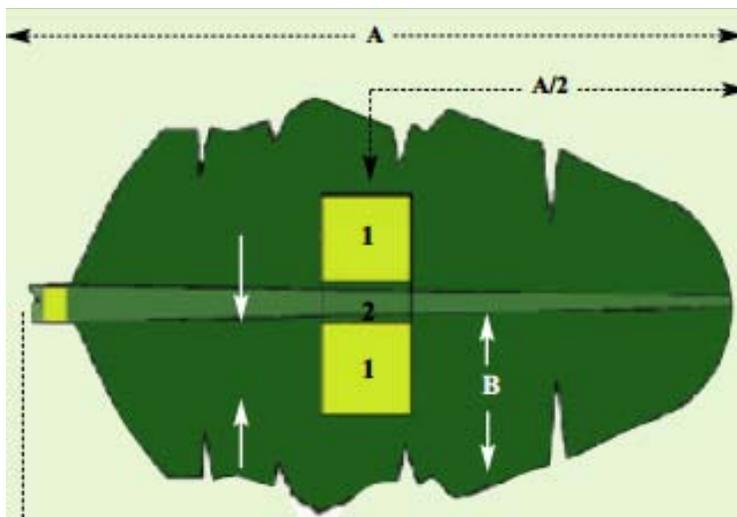


Figura 6. Muestreo foliar en banano para determinar el contenido de nutrientes. \*El numeral 1 hace referencia a la selección de lámina de la 3 hoja y 2- Selección de la nervadura central de la 3 hoja (Espinosa & Mite, 2002).

### 7.3 Laboratorio.

#### 7.3.1 Preparación y separación de muestras

Las muestras edáficas y foliares fueron preparadas para someterlas a diferentes procedimientos. Las muestras de suelo se pasaron por un tamiz de 5 mm y luego se separaron sub-muestras para la determinación de hongos solubilizadores de fosfatos, hongos de micorriza arbuscular, determinaciones edáficas (CIC, Ca, Mg, K, Na, P, aluminio de cambio, saturación de bases, CO, textura, pH, contenido de P total y disponible) y el contenido de humedad, el cual se determinó con 15 g de suelo a través de la diferencia de peso después de secado al horno a 105°C durante 72 horas. Adicionalmente, se separaron muestras con raíces para evaluar el nivel de colonización por HMA.

Una muestra de aproximadamente 500g se envió al laboratorio de suelos del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), para realizar las determinaciones de capacidad de intercambio catiónico (CIC), calcio (Ca), magnesio (Mg), potasio (K), sodio (Na), fósforo (P), aluminio de cambio, saturación de bases, carbón orgánico (CO) estas se realizaron

mediante saturación con acetato de amonio ( $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ ) 1 N pH 7 y su cuantificación se realizó por volumetría, emisión y absorción atómica (Rhoades, 1982).

Para el pH se utilizó el método potenciométrico en agua destilada en proporción 1:1 (Bates, 1954; Willard, Merritt & Dean, 1974), por otro lado la textura fue analizada por medio del fraccionamiento de suelo en porciones de arena, limo y arcilla (Bouyoucos, 1951), el carbono orgánico fue determinado por oxidación húmeda del suelo con dicromato de potasio en estado ácido ( $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ) y combustión en un analizador elemental (Walkley & Black, 1934).

Adicionalmente a estas pruebas, se determinó el contenido de fósforo total y disponible en suelos. El primero se estableció en una mezcla de nitrato de potasio ( $\text{KNO}_3$ )/ nitrato de sodio ( $\text{NaNO}_3$ ) y su cuantificación fue colorimétrica por Bray II (Bray & Kurtz, 1945). El fósforo disponible se realizó con ácido cítrico al 1% y colorimetría con molibdato de amonio Bray II (Bray & Kurtz, 1945).

En cuanto a las muestras foliares, estas se limpiaron y se empacaron debidamente en bolsas de papel, luego se secaron en horno a  $80^\circ\text{C}$  por tres días, se sellaron y etiquetaron para ser enviadas al laboratorio de suelos del IGAC para la determinación del contenido de fósforo en tejidos vegetales. Para determinar el contenido de fósforo total en tejido vegetal se utilizaron las pruebas de alta temperatura de oxidación: incineración en seco y la digestión de microondas de tejido vegetal en un recipiente cerrado por Robert Miller y descritas en el manual de métodos de referencia para el análisis de la planta editado por Kalra (1998).

### **7.2.2 Aislamiento e identificación de HMA**

El aislamiento de los hongos formadores de micorriza arbuscular para cada zona se realizó por el método de tamizaje húmedo y decantación, desarrollado por Sieverding en 1983, en el proyecto Micorriza – CIAT, para el aislamiento de esporas de HMA, el cual consiste en tomar 10g de cada sub-muestra seca, esta pasó por tamices de  $500\ \mu$ ,  $250\ \mu$ ,  $125\ \mu$  y  $45\ \mu$ , se colocó la muestra con agua en el primer tamiz y se decantó por este hacia el otro; se continuo haciendo lo mismo con los demás tamices hasta obtener dos muestras en los

tamices de 125  $\mu$  y 45  $\mu$ , que fueron recogidas con una espátula de punta fina para pasarlo a tubos Falcon de 50 ml en un gradiente de sacarosa al 70% (Prager *et al.* 2010).

Posteriormente cada tubo fue completado hasta 50 ml con agua y centrifugado a 3350 rpm por 3 minutos. Pasado el tiempo de centrifugación, se extrajo con una jeringa la fase intermedia de los tubos, lo cual fue lavado con agua de grifo, en un tamiz de 45  $\mu$  para limpiarla de impurezas y restos de sacarosa. Con ayuda del frasco lavador se pasó el material restante de cada muestra a una caja de Petri etiquetada, luego en el estereoscopio y con ayuda de jeringas se apartaron las esporas de los acompañantes indeseados en la muestra en cada una de las cajas, para su aislamiento y con otra jeringa recolectora de esporas se tomaron cada una de ellas, pasándolas a portaobjetos. Para su conservación se les aplico una gota de PVGL, cubiertas con láminas cubre objetos y selladas con esmalte (Prager *et al.* 2010).

Ya con estos montajes se procedió a realizar la identificación de los hongos, por medio de una caracterización microscópica, las esporas se compararon por medio de claves taxonómicas actualizadas desde el 2008 al presente, consultando las páginas del INVAM (<http://invam.wvu.edu>, 2015), Index fungorum (<http://www.indexfungorum.org/Names/Names.asp>, 2015) y Januz Blaszkowski (<http://www.zor.zut.edu.pl/Glomeromycota/index.html>, 2015), además se indagaron los artículos de Spain, Sieverding & Oehl (2006); Oehl, Silva, Goto & Sieverding (2011); Oehl *et al.* (2011) y Oehl, Redecker & Sieverding (2005), en las cuales se reportan los resultados como especies y morfoespecies que se han encontrado a través del tiempo y se contó con la asesoría para la confirmación de las especies identificadas, de parte del Doctor Ewald Sieverding de la Universidad de Hohenheim, Stuttgart, Alemania.

### **7.2.3 Cuantificación de la colonización por HMA**

Para la cuantificación de la colonización por HMA se seleccionaron las raíces terciarias y cuaternarias de todas las muestras las cuales fueron lavadas con agua de grifo para eliminar partículas de suelo e impurezas, una vez realizado este procedimiento, se continuó con el aclaramiento, cortando con un bisturí las raíces en segmentos, de aproximadamente 4 cm y depositándolas en beakers donde fue agregado KOH al 10% hasta cubrirlas completamente

(Sánchez de Prager *et al.* 2010 Citando a Bevege, 1968; Sánchez de Prager, 2003; Vierheilig *et al.* 1998); luego se sometieron a ebullición por 45 minutos, para obtener un decoloramiento óptimo. Una vez terminado, las raíces fueron lavadas cuidadosamente con agua del grifo y con una pinza se trasladaron a tubos de ensayo, luego se realizó una tinción diferencial, para la cual se utilizó el método de tinción con tinta sheaffer empleando vinagre (Vierheilig *et al.* 1998).

La coloración consistió en cubrir las raíces con la solución de tinta de color negro al 5% en vinagre al 4%, luego colocarlos en el baño de María a 90°C por 5 minutos, se retiró la tinta con suficiente agua del grifo, se sumergieron en vinagre al 4% por 20 minutos, luego se realizó un lavado en agua retirando el exceso de ácido acético (Sánchez de Prager *et al.* 2010) y finalmente se depositaron en las cajas de Petri. Una vez terminado el proceso, se colocaron fragmentos de aproximadamente 1 cm de las raíces teñidas en un portaobjetos, obteniendo cuatro grupos de cinco raíces cada una. Se les agregó una gota de PVLG (alcohol polivinílico-glicerol-ácido láctico) para su conservación y se colocó cubre objetos para su observación en el microscopio (Prager *et al.* 2010), este procedimiento se realizó por cada muestra de rizosfera obteniendo cuatro sub-muestras por cada una de ellas, para un total de veinticuatro muestras por finca y noventa y seis por zona.

Posteriormente, se determinó para cada finca el porcentaje de colonización radical, por medio del método de intercepción de campos por placa descrito en Sánchez de Prager *et al.* (2010), el cual consiste en colocar cada portaobjetos con las raíces en el microscopio utilizando el objetivo que permita observar claramente la presencia de la simbiosis, se recorre la lámina en sentido horizontal y perpendicular, empezando por un extremo de la raíz, indicando si existe presencia de colonización, de esta manera se pasa por todos los campos; se recorre toda la placa en donde se encuentre presencia de raíz, finalmente se suman el total de campos observados y se procede a determinar el porcentaje de colonización con la fórmula mostrada en la Figura 7 (Andrade-Linares *et al.* 2011; McGonigle *et al.* 1990; Sánchez de Prager *et al.* 2010; Vohník & Albrechtová, 2011) y utilizado por Posada, Madriñan, & Rivera, 2012. La colonización por HMA se caracterizó por la presencia de micelio, hifas cenocíticas con el borde interno irregular, arbusculos, vesículas y/o combinaciones teñidas de color azul.

$$\% \text{ de colonización por HMA} = \frac{\text{Campos colonizados}}{\text{Campos totales}} \times 100$$

Figura 7. Porcentaje de colonización por HMA.

#### 7.2.4 Aislamiento e identificación de HSP

Para el aislamiento de los hongos solubilizadores de fosfato, cada muestra fue previamente tamizada en seco en una malla de 2 mm, seguidamente se utilizó el método de tamizaje húmedo de partículas, la cual permite encontrar micelio activo descrito en Bills, Mueller & Foster (2004), en donde cada muestra fue lavada con 2 litros de agua destilada en tamices de 500 $\mu$ , 250 $\mu$  y 125 $\mu$ ; posteriormente los granulos se colocaron sobre papel filtro en cajas Petri, las cuales se secaron a temperatura ambiente en una desecadora de vidrio con sílica gel durante 5 a 7 días, luego de obtener las muestras secas, se realizó la siembra de gránulos para el aislamiento de HSP, se tomaron 5 gránulos de suelo y se sembraron en una caja Petri con agar Sundara & Sinha (S&S) (1963) (Anexo 1), enriquecido con 0.5 g/L de fosfato tricálcico Ca<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> (medio indicativo por su facilidad para distinguir el halo de solubilización).

Se colocó una mezcla de antibioticos (Cloranfenicol-0.1g/L, Gentamicina-50mg/L y Tetraciclina-50mg/L), con el fin de evitar la presencia de bacterias y hongos de rápido crecimiento (Posada *et al.* 2012), posteriormente se realizaron 4 repeticiones con el mismo procedimiento donde los gránulos en medio de cultivo fueron incubados de 3-6 días a una temperatura aproximadamente de 21°C (Gualdrón, Suárez & Valencia,1997). Con estos se procedió a identificar la actividad solubilizadora, seleccionando las colonias que presentaron un halo de solubilización claro o transparente alrededor de la colonia fúngica (Vera, Perez & Valencia, 2002a).

Los hongos aislados y purificados se expusieron a la evaluación de su actividad empleando como fuente de fósforo, fosfato tricálcio  $\text{Ca}_3 (\text{PO}_4)_2$ , para seleccionar las cepas con mayores valores de capacidad de solubilización (>200%) (Vera, Pérez & Valencia, 2002a; Hernández, Carrión & Heredia, 2011), en medio de cultivo S&S e incubados a 21°C por 8 días, la selección preliminar de cepas se realizó mediante la cuantificación de la eficiencia relativa de solubilización (ERS) para cada aislamiento, de acuerdo con la fórmula (Figura 8) (Vera, Pérez & Valencia, 2002a; Mahamuni, Wani & Patil, 2012; Lapeyre, Ranger & Vairelles, 1990).

$$ERS = \frac{\text{Diámetro promedio de solubilización (mm)}}{\text{Diámetro promedio de la colonia (mm)}} \times 100$$

Figura 8. Eficiencia relativa de solubilización.

Posteriormente, se realizó una caracterización macroscópica y microscópicamente e identificación hasta género y/o especies de las cepas solubilizadoras seleccionadas siguiendo las claves de Domsch, Gams, & Anderson (2007), Barnett & Hunter (1998), la base actualizada de MycoBank y en caso de no hacerlo los aislamientos fueron denominados morfoespecie en forma secuencial (es una especie no identificada, disímil en características morfológicas), además se contó con la asesoría para la respectiva confirmación de las identificaciones realizadas, de parte de la Doctora Cinthya Ivonne Becerra, del Instituto de Ecología, A.C. Xalapa, Veracruz.

#### **7.4 Análisis de datos**

A partir de los datos de colonización de las raíces por HMA, la abundancia de los HSP, los datos de contenido nutricional del suelo y plantas, incluido el P tanto total como disponible

en cada sitio de muestreo en las diferentes plantaciones y zonas geográficas, se procedió a realizar los siguientes análisis:

Se realizó un análisis de componentes principales (ACP) para encontrar variables o conjuntos de variables con mayor influencia sobre los parámetros, a su vez permite descartar aquellos parámetros con poca influencia o poca variabilidad y emplear la restantes en el análisis de varianza- covarianza.

Se realizó un modelo conceptual previo de las posibles interacciones entre las variables influyentes (Figura 9) (Arbuckle, 2010), para encontrar los factores que influyen sobre el contenido de fósforo foliar (objetivo 1) y para determinar las posibles asociaciones entre los parámetros edáficos, biológicos (hongos de estudio) y el contenido foliar, donde las variables respuesta fueron HMA y HSP. Este modelo fue analizado mediante un análisis de varianza-covarianza por medio de modelos basados en ecuaciones estructurales con el fin de evaluar las relaciones directas e indirectas entre las 72 réplicas influyentes en los parámetros biológicos, reduciendo progresivamente los parámetros – varianzas, covarianzas y correlaciones– que se podían ajustar en los modelos. Se establecieron las relaciones necesarias para reducir el chi cuadrado ( $\chi^2$ ) y obtener un alto valor de P, debido a que bajos valores de este último indican carencia de ajuste (Arbuckle, 2010).

Se debe tener en cuenta que las interacciones cuya presencia no contribuyó en el ajuste del modelo (cuando los coeficientes de ruta ( $\lambda$ )  $\leq 0.05$ ) fueron removidos para conservar las variables necesarias y de esta manera lograr conservar el poder estadístico, basados en las interacciones que se obtuvieron, se pudo determinar los subgrupos de interacciones que generaran posibles variaciones del modelo, donde el modelo de mejor ajuste se seleccionó siguiendo la máxima P y mínima c/df (discrepancia/grados de libertad). Cada una de las asociaciones fueron representadas como coeficientes estandarizados (estandarizados por la desviación estándar de las variables), los cuales son una medida de la fuerza de la relación causal, los valores de  $r^2$  representan la proporción de la varianza explicada por cada conjunto de variables vinculadas al fósforo foliar (P foliar), HMA y HSP (Posada *et al.* 2012).

Los modelos basados en Ecuaciones Estructurales se derivan de una síntesis de análisis de relaciones y análisis de factores, usualmente con un test de bondad de ajuste basado en máxima verosimilitud (Antoninka *et al.* 2009), los coeficientes de la relación directa se obtuvieron por medio de reglas de relaciones por medio de la cuantificación de los efectos de todas las rutas indirectas a las variables de interés (Grace, 2006). Por ende, los efectos totales se calcularon por la suma de los efectos directos e indirectos, todas las asociaciones y análisis se realizaron y por medio del programa AMOS 18 (Arbuckle, 2010).

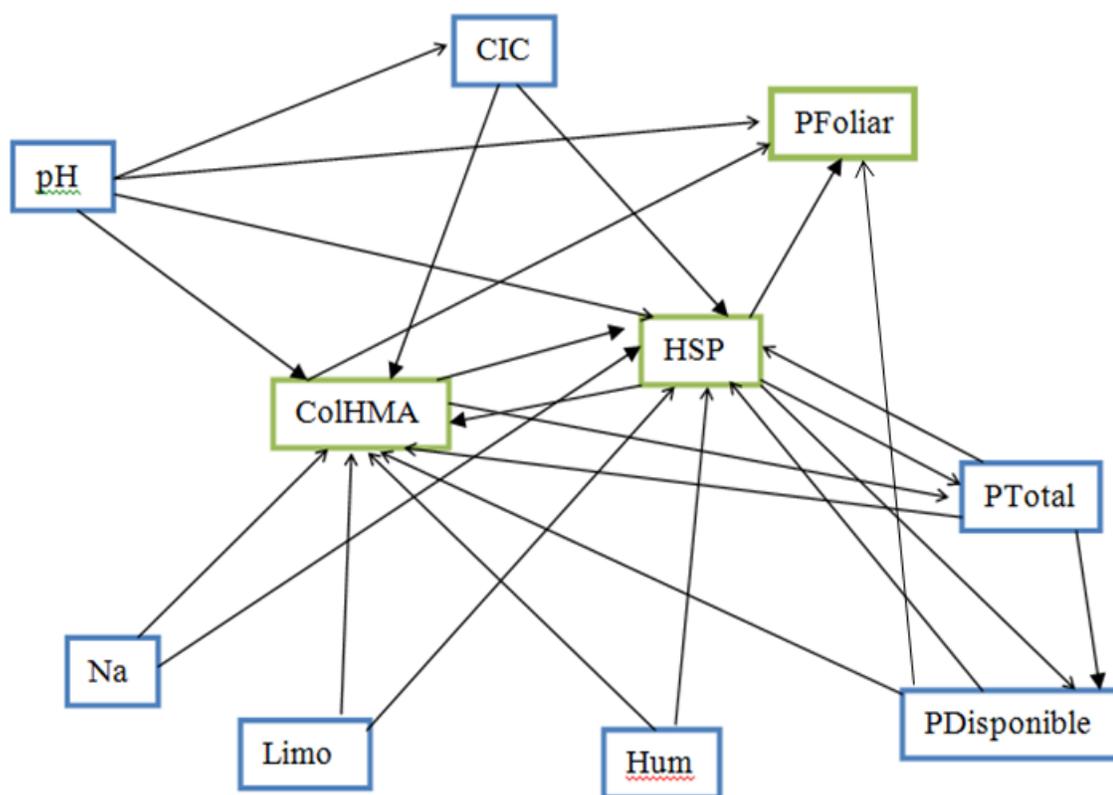


Figura 9. Modelo conceptual de relaciones entre las variables independientes y de respuesta. Las flechas indican asociaciones hipotéticas y regresiones entre dos variables. Las cajas verdes corresponden a las variables respuesta a evaluar, las cajas azules corresponden a las variables edáficas. CIC= Capacidad de intercambio catiónico, PFoliar= Fósforo foliar, ColHMA= Colonización de Hongos formadores de micorriza arbuscular, HSP= Hongos solubilizadores de fósforo, PTotal= Fósforo total, Na= Sodio, Hum= Humedad y PDisponibile= Fósforo Disponible.

## 8. RESULTADOS

### 8.1 Factores que pueden influir en el contenido nutricional de las plantas de banano

Se determinaron los promedios y error estándar de todas las variables analizadas por cada sistema de producción, como se muestra en la Tabla 9, con el fin de observar la variabilidad de cada uno de los parámetros y confirmar las diferencias de cada uno de ellos entre zonas y cultivos.

Se observó que los valores promedio en los contenidos de fósforo disponible y de fósforo total, fueron mayores en las fincas de la zona 1- Cundinamarca. Los cultivos muestreados en la zona de Cundinamarca presentaron en promedio un pH (4,3- 5,1), Na (0,2-0,4), limo (29,7- 35,1), humedad (20,0- 30,8), fósforo disponible (55,10- 220,4), fósforo total (863- 1673) y fósforo foliar (0,02-0,02). Las plantaciones de la zona de Antioquia un pH (4,7- 5,6), Na (0,3- 0,4), limo (38,7- 48,9), humedad (22,6- 28,6), fósforo disponible (53,6- 113,0), fósforo total (582- 690) y fósforo foliar (0,01- 0,03). Las plantaciones de la zona del Magdalena un pH (4,9- 7,6), Na (0,3- 1,0), limo (38,9- 50,5), humedad (15,1- 22,8), fósforo disponible (155,5- 243,1), fósforo total (848,3- 1175,6) y fósforo foliar (0,05- 0,12). Lo cual repercute en cambios en la colonización por HMA y abundancia por HSP, ante cambios en el entorno en los sistemas productivos muestreados en las tres zonas (Tabla 9), corroborando que en cada cultivo de banano, hay distintas variables físicas, químicas y biológicas que se asocian de manera directa o indirecta con la microbiota (Anexo 2).

Tabla 9. Promedio de observaciones  $\pm$  error estándar para las variables físico- químicas, edáficas y biológicas en las 12 fincas bananeras muestreadas en las 3 zonas

Variable	*ZONA 1- Cundinamarca				*ZONA 2-Antioquia				*ZONA 3-Magdalena			
	CAM	ERE	BRS	SEN	DAL	LVE	LVI	MAK	LEL	LLO	LMA	PCA
Arena (%)	50,7 $\pm$ 5,8	47,8 $\pm$ 4,1	23,1 $\pm$ 4,1	22,9 $\pm$ 4,1	34,4 $\pm$ 4,1	17,8 $\pm$ 4,1	24, $\pm$ 1	38,3 $\pm$ 4,5	48,3 $\pm$ 4,1	27,1 $\pm$ 4,1	47,5 $\pm$ 4,1	39,6 $\pm$ 4,1
Limo (%)	29,7 $\pm$ 3,8	35,1 $\pm$ 2,7	35,1 $\pm$ 2,7	30,9 $\pm$ 2,7	48,9 $\pm$ 2,7	41,8 $\pm$ 2,7	38,7 $\pm$ 2,7	42,7 $\pm$ 2,9	41,9 $\pm$ 2,7	50,6 $\pm$ 2,6	38,9 $\pm$ 2,7	50,3 $\pm$ 2,7
Arcilla (%)	19,6 $\pm$ 3,4	17,1 $\pm$ 2,4	41,8 $\pm$ 2,4	46,1 $\pm$ 2,4	16,7 $\pm$ 2,4	40,3 $\pm$ 2,4	36,8 $\pm$ 2,4	9,0 $\pm$ 2,6	9,8 $\pm$ 2,4	22,3 $\pm$ 2,4	13,5 $\pm$ 2,4	10,1 $\pm$ 2,4
pH	4,3 $\pm$ 0,3	4,5 $\pm$ 0,3	5,1 $\pm$ 0,3	5,1 $\pm$ 0,3	4,9 $\pm$ 0,3	4,7 $\pm$ 0,3	5,6 $\pm$ 0,3	5,0 $\pm$ 0,3	4,9 $\pm$ 0,3	6,1 $\pm$ 0,3	6,3 $\pm$ 0,3	7,6 $\pm$ 0,3
CO (%)	7,7 $\pm$ 0,6	6,6 $\pm$ 0,6	4,9 $\pm$ 0,6	5,2 $\pm$ 0,6	1,0 $\pm$ 0,6	1,1 $\pm$ 0,6	1,3 $\pm$ 0,6	0,8 $\pm$ 0,6	1,9 $\pm$ 0,6	1,9 $\pm$ 0,6	1,6 $\pm$ 0,6	1,5 $\pm$ 0,6
CIC	35,4 $\pm$ 2,7	44,0 $\pm$ 2,7	40,5 $\pm$ 2,7	37 $\pm$ 2,7	21,4 $\pm$ 2,7	28,1 $\pm$ 2,7	28,7 $\pm$ 2,7	17,9 $\pm$ 2,7	15,7 $\pm$ 2,7	17,6 $\pm$ 2,7	15,8 $\pm$ 2,7	13,9 $\pm$ 2,7
Ca	1,4 $\pm$ 0,9	2,1 $\pm$ 0,9	4,8 $\pm$ 0,9	3,9 $\pm$ 0,9	4,4 $\pm$ 0,9	4,4 $\pm$ 0,9	7,8 $\pm$ 0,9	3,7 $\pm$ 0,9	3,3 $\pm$ 0,9	5,3 $\pm$ 0,9	4,4 $\pm$ 0,9	6,9 $\pm$ 0,9
Mg	0,5 $\pm$ 0,2	0,9 $\pm$ 0,2	1,1 $\pm$ 0,2	1,0 $\pm$ 0,2	1,2 $\pm$ 0,2	1,6 $\pm$ 0,2	1,8 $\pm$ 0,2	1,2 $\pm$ 0,2	1,1 $\pm$ 0,2	1,6 $\pm$ 0,2	2,0 $\pm$ 0,2	2,1 $\pm$ 0,2
K	0,7 $\pm$ 0,2	1,3 $\pm$ 0,2	1,1 $\pm$ 0,2	0,8 $\pm$ 0,2	2,2 $\pm$ 0,2	1,9 $\pm$ 0,2	1,9 $\pm$ 0,2	1,8 $\pm$ 0,2	0,9 $\pm$ 0,2	0,8 $\pm$ 0,2	0,6 $\pm$ 0,2	0,6 $\pm$ 0,2
Na	0,2 $\pm$ 0,1	0,4 $\pm$ 0,1	0,3 $\pm$ 0,1	0,2 $\pm$ 0,1	0,3 $\pm$ 0,1	0,3 $\pm$ 0,1	0,4 $\pm$ 0,1	0,3 $\pm$ 0,1	0,3 $\pm$ 0,1	0,7 $\pm$ 0,1	0,6 $\pm$ 0,1	1,0 $\pm$ 0,1
P disponible (ppm)	55,1 $\pm$ 60,1	220,4 $\pm$ 60,1	145 $\pm$ 60,1	88,5 $\pm$ 60,1	85,9 $\pm$ 60,1	53,6 $\pm$ 60,1	113 $\pm$ 60,1	104,4 $\pm$ 60,1	160,1 $\pm$ 60,1	195,7 $\pm$ 60,1	155,5 $\pm$ 60,1	243,1 $\pm$ 60,1
P total (ppm)	863 $\pm$ 175,4	1107 $\pm$ 175,4	1673 $\pm$ 175,4	1612 $\pm$ 175,4	690 $\pm$ 175,4	603 $\pm$ 175,4	688 $\pm$ 1754	582 $\pm$ 175,4	969 $\pm$ 175,4	917 $\pm$ 175,4	848 $\pm$ 175,4	1175 $\pm$ 175,4
Humedad (%)	30,8 $\pm$ 1,2	20,0 $\pm$ 2,2	27,9 $\pm$ 2,6	28,3 $\pm$ 1,8	24,2 $\pm$ 1,1	28,7 $\pm$ 1,3	28,4 $\pm$ 2,1	22,6 $\pm$ 1,2	20,9 $\pm$ 1,9	22,8 $\pm$ 1,1	15,1 $\pm$ 1,0	21,3 $\pm$ 1,0
Colonización por HMA (%)	32,9 $\pm$ 2,9	18,4 $\pm$ 2,9	21,9 $\pm$ 2,9	25,0 $\pm$ 3,0	16,4 $\pm$ 3,0	13,8 $\pm$ 2,9	13,2 $\pm$ 2,9	16,8 $\pm$ 3,0	16,9 $\pm$ 2,9	14,7 $\pm$ 2,9	13,8 $\pm$ 3,0	24,9 $\pm$ 2,9
HSP (%)	0,7 $\pm$ 0,1	0,7 $\pm$ 0,2	0,8 $\pm$ 0,4	0,7 $\pm$ 0,2	0,7 $\pm$ 0,4	1,0 $\pm$ 0,3	0,5 $\pm$ 0,5	0,5 $\pm$ 0,2	0,7 $\pm$ 0,1	0,7 $\pm$ 0,7	0,7 $\pm$ 0,2	0,7 $\pm$ 0,1
P foliar (ppm)	0,02 $\pm$ 0,14	0,02 $\pm$ 0,16	0,02 $\pm$ 0,20	0,02 $\pm$ 0,14	0,01 $\pm$ 0,06	0,02 $\pm$ 0,21	0,03 $\pm$ 0,19	0,01 $\pm$ 0,10	0,05 $\pm$ 0,34	0,07 $\pm$ 0,33	0,02 $\pm$ 0,16	0,12 $\pm$ 0,52

\*Fincas CAM=Campo Alegre, ERE=El Recuerdo, BRS= Los Bohio, Rosas y Serafines, SEN=San Enrique, DAL=Dallas, LVE=Las Vegas, LVI=La Victoria, MAK= Makaira, LEL=La Eloisa, LLO=La Lorena, LMA=La Marcela, PCA=Puerto Carreño

## 8.2 HMA y HSP encontrados en las tres zonas muestreadas

Se encontraron 15 géneros de HMA (Figura 10): *Acaulospora*, *Ambispora*, *Archaeospora*, *Claroideoglosum*, *Entrophospora*, *Funneliformis*, *Gigaspora*, *Glomus*, *Intraspora*, *Kuklospora*, *Pacispora*, *Paraglosum*, *Redeckera*, *Septoglosum* y *Simiglosum*.

En la Figura 11 se presentan todas las especies de HMA halladas en cada zona y cuáles de estas son comunes entre cada una, encontrando que la zona con mayor diversidad de HMA fue la zona del Magdalena (Z3) con 55 morfoespecies entre los que se presentaron principalmente el género *Glomus* y *Acaulospora*, le sigue Antioquia (Z2) donde se hallaron 33 morfoespecies donde resalta el género *Acaulospora* y en la zona de Cundinamarca (Z1), se hallaron en total 32 morfoespecies siendo el principal género *Acaulospora*. Además se encontraron como especies y/o morfoespecies únicas: en la Z1 a *Glomus* sp5, *Acaulospora rehmi*, *Acaulospora* sp14, *Simiglosum hoi* y *Glomus microcarpum*; en la Z2 a *Acaulospora* sp17, *Acaulospora* sp22, *Glomus multiforum*, *Glomus* sp7 y *Pacispora* sp1, mientras que en la Z3 se identificaron 23 especies, correspondientes a *Acaulospora* sp23, *Redeckera* sp1, *Claroideoglosum* sp4, *Archaeospora* sp1, *Paraglosum brasilianum*, *Ambispora* sp1, *Claroideoglosum* sp3, *Funneliformis coronatus*, *Glomus* sp4, *Glomus* sp6, *Intraspora* sp1, *Septoglosum* sp2, *Acaulospora* sp7, *Gigaspora* sp1, *Gigaspora* sp2, *Glomus aggregatum*, *Glomus intraradices*, *Glomus walkeri*, *Glomus liquidambaris*, *Glomus* sp2, *Glomus* sp3, *Glomus* sp8 y *Kuklospora* sp1.

Entre todas las zonas se encontró 15 morfoespecies en común donde predomina el género *Acaulospora*, entre la zona 1 y la zona 2 se encontraron 4 especies diferentes: *Septoglosum* sp1, *Acaulospora* sp9, *Glomus* sp1 y *Claroideoglosum* sp8, entre las Z1 y Z3 hubo presencia de 8 morfoespecies en común: *Claroideoglosum* sp6, *Glomus* sp10, *Acaulospora* sp11, *Claroideoglosum* sp1, *Glomus* sp9, *Gigaspora* sp3, *Glomus rubiforme* y *Glomus sinuosum*, mientras que entre Z2 y Z3 fueron 9 morfoespecies: *Acaulospora* sp15, *Acaulospora* sp18, *Acaulospora undulata*, *Acaulospora* sp19, *Acaulospora* sp1, *Glomus verruculosum*, *Claroideoglosum* sp7, *Funneliformis mosseae* y *Glomus fulvum*.

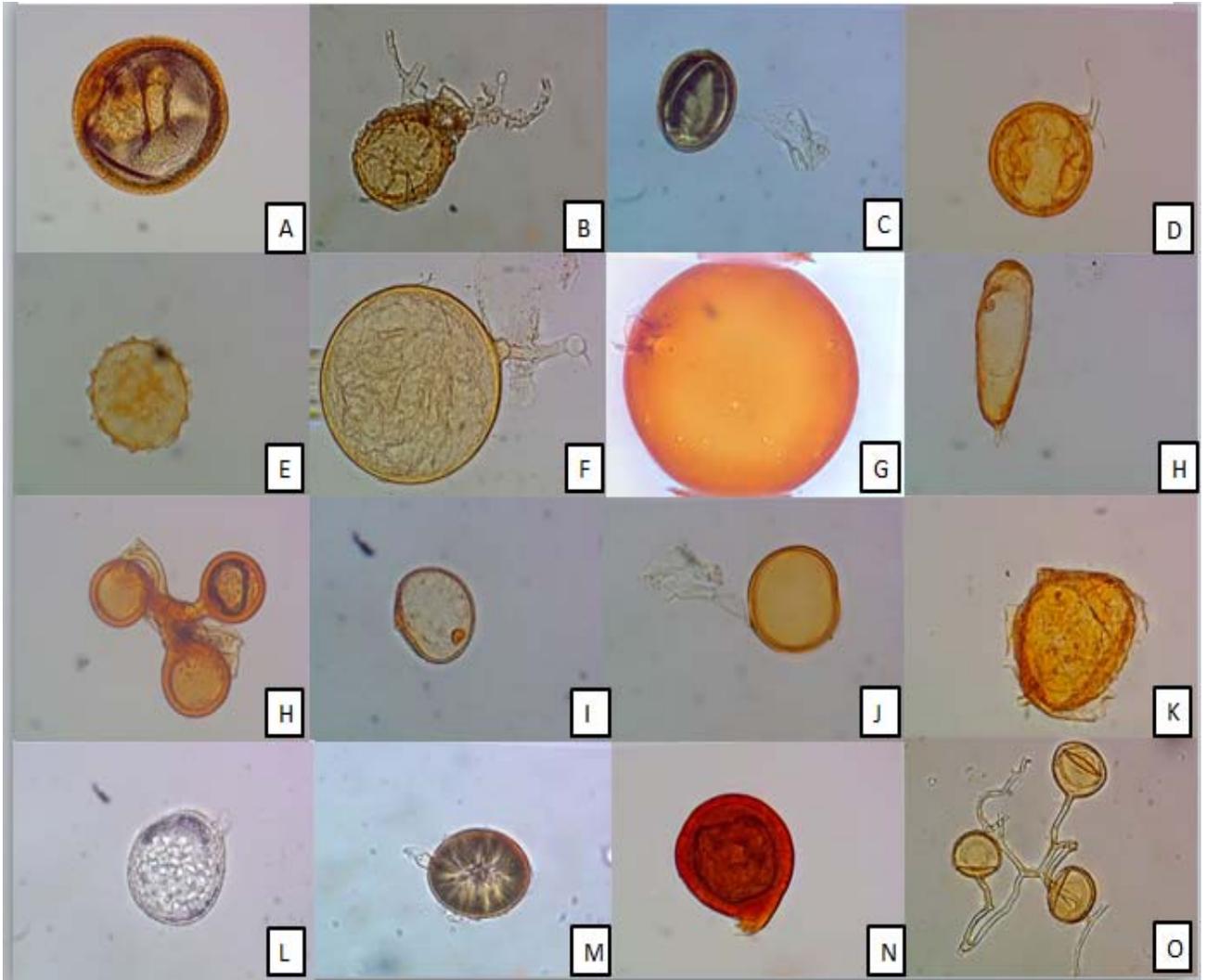


Figura 10. Morfoespecies de HMA encontrados en las tres zonas muestreadas. A-*Acaulospora* sp, B-*Ambispora* sp, C-*Archaeospora* sp, D-*Clareideoglopus* sp, E-*Entrophospora* sp, F-*Funneliformis* sp, G-*Gigaspora* sp, H-*Glomus* sp, I-*Intraspora* sp, J-*Kuklospora* sp, K-*Pacispora* sp, L-*Paraglopus* sp, M-*Redeckera* sp, N-*Septoglopus* sp y O-*Simiglopus* sp.

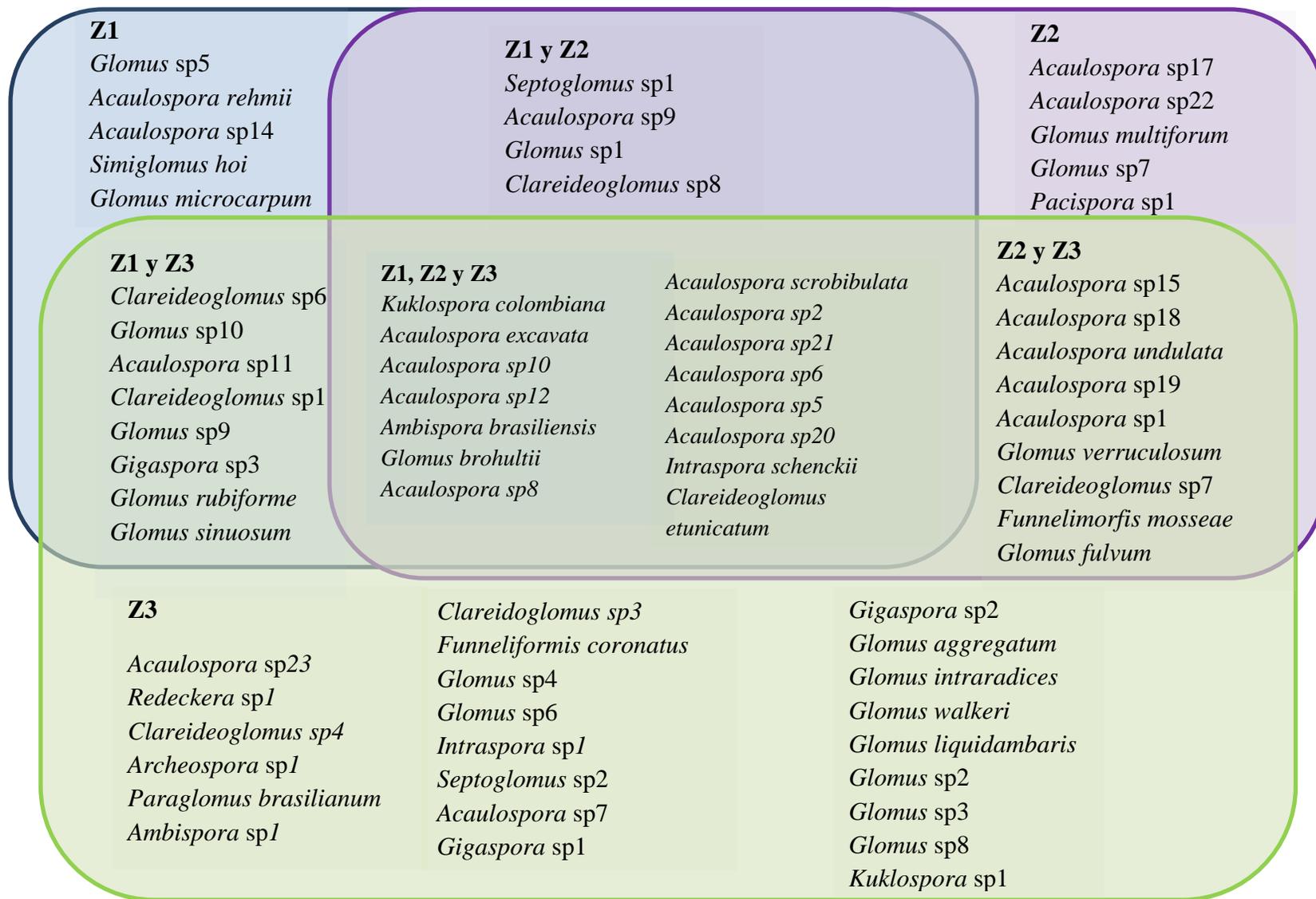


Figura 11. Especies de HMA en cada zona y especies comunes entre zonas. El cuadrado azul hace referencia a Z1- Cundinamarca, el cuadrado morado a Z2- Antioquia y el cuadrado verde a Z3- Magdalena

De los aislamientos de hongos solubilizadores de fosfato, de las tres zonas (Figura 12) se identificaron: 9 morfoespecie, 8 géneros correspondientes a *Penicillium*, *Paecilomyces*, *Alysidium*, *Humicola*, *Fusarium*, *Aureobasidium*, *Coniothyrium* y *Aspergillus*, además de *Mycelia sterilia*.

Se encontró que entre las zonas de estudio la zona de Antioquia (Z2) tuvo una baja presencia de HSP a comparación de las otras dos zonas, debido a que solo se encontraron 5 morfoespecies correspondientes a *Penicillium glaucum*, *Paecilomyces lilacinus*, *Fusarium* sp1 y 2 morfoespecies como se evidencia en la Figura 13, le sigue la zona de Cundinamarca (Z1) donde se hallaron 10 morfoespecies donde la mayor presencia corresponde a *Penicillium* sp, mientras que en la zona del Magdalena (Z3) hubo una mayor riqueza con 13 morfoespecies, donde se halló una cepa perteneciente a *Mycelia sterilia*. Además se encontraron como especies y/o morfoespecies únicas: en la Z1 9, 3 especies de *Penicillium*, *Paecilomyces fumosoroseus*, 3 morfoespecies no identificadas, *Alysidium* sp1 y *Humicola* sp1; en la zona de Antioquia 2 morfoespecies, y para la Z3 9 correspondientes a *Aureobasidium* sp1, *Coniothyrium* sp1, *Humicola* sp2, *Aspergillus* sp1, 4 morfoespecies no identificadas y *Mycelia sterilia*.

En la Figura 13 se puede detallar que entre la zona 1 (Cundinamarca) y la zona 2 (Antioquia) no se encontraron especies en común, igual que para las tres zonas, por otro lado la zona 2 (Antioquia) y la zona 3 (Magdalena) exhiben 3 especies en común de diferentes géneros; entre Z1 y Z3 se encontró *Penicillium* sp4.

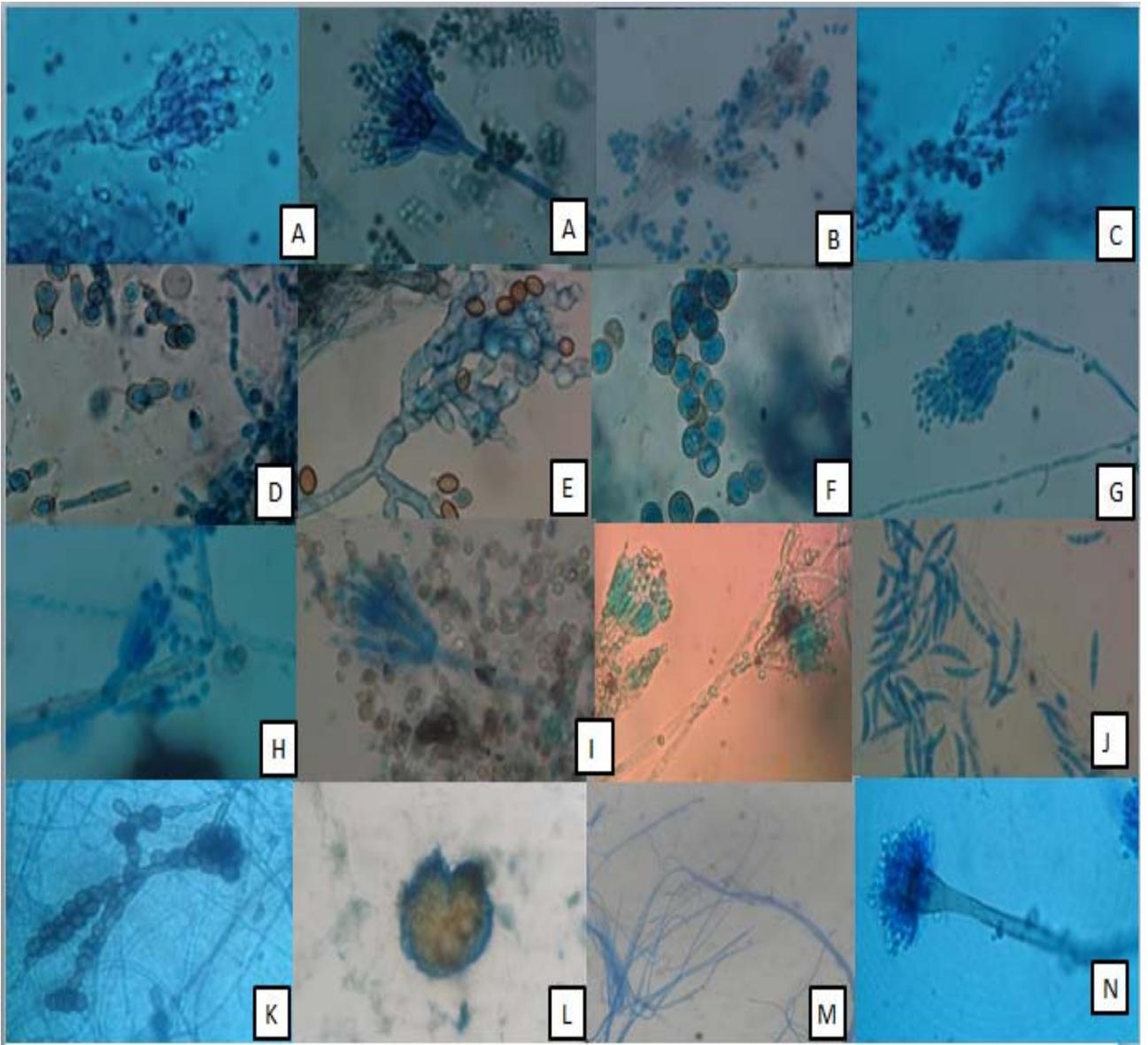


Figura 12. Morfoespecies de HSP encontrados en las zonas de estudio. A-Penicillium sp, B-Paecilomyces sp, C y D- Morfoespecies, E-Alysidium sp, F-Humicola sp, I y G-Penicillium sp, H-Paecilomyces sp, J-Fusarium sp, K-Aureobasidium sp, L-Coniothyrium sp, M-Mycelia sterilia y N-Aspergillus sp. Fuente: Pulido & Niño (2015).

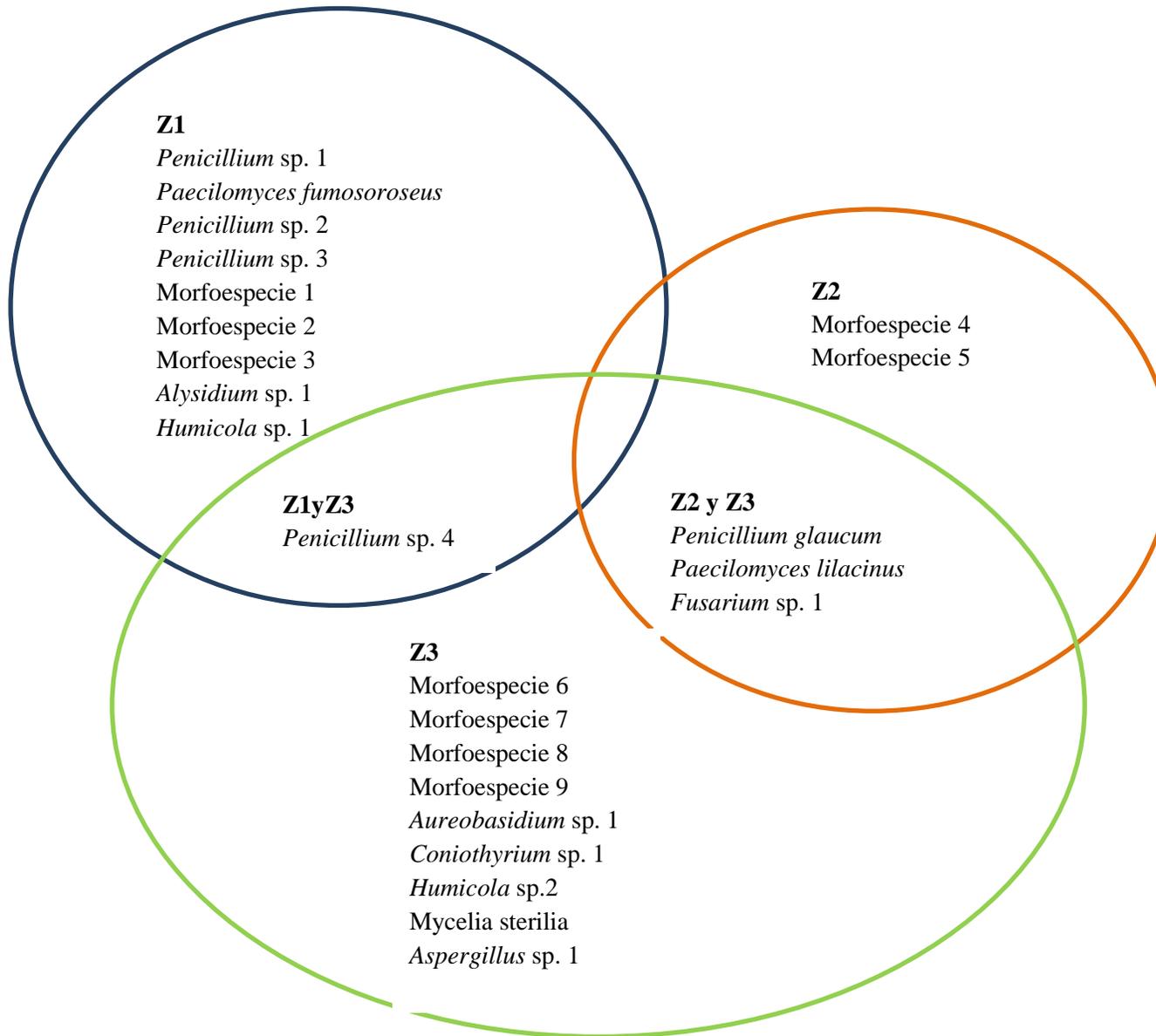


Figura 13. Morfoespecies no identificadas, géneros y/o especies de HSP encontrados en cada zona muestreada y cuales son comunes entre zonas. El círculo azul hace referencia a la zona 1-Cundinamarca, el círculo naranja a zona 2- Antioquia y el círculo verde a zona 3- Magdalena comunes entre zonas.

### 8.3 Colonización de raíces por HMA

Los promedios de colonización por HMA son similares entre las dos zonas bananeras muestreadas ya que la zona 2- Antioquia se encontró 13,2 a 16,8% y en la zona 3- Magdalena de 13,8 a 24,9%; por otro lado para la zona 1- Cundinamarca fueron más altos, de 18,4 a 32,9% a comparación de las otras zonas. Además, la finca Campo Alegre en la Z1 presentó los niveles más altos de colonización con un 32,9% entre las 12 fincas muestreadas y La Victoria de la Z2 fue la de menor porcentaje de colonización con un 13,2%.

Cabe resaltar que la concentración de fósforo edáfico disponible (ppm) en la zona de Cundinamarca presentó un rango de 55,1 a 220,4 ppm, en la zona 2 de 53,6 a 113ppm y por ultimo para la zona 3 de 155,5-243,1 ppm, a pesar de estos resultados se pudo determinar que existe una gran diversidad de hongos formadores de micorriza arbuscular en suelos ácidos y con alto contenidos de fósforo, los cuales pueden ser debido a la sobre fertilización en los sistemas de producción de banano.

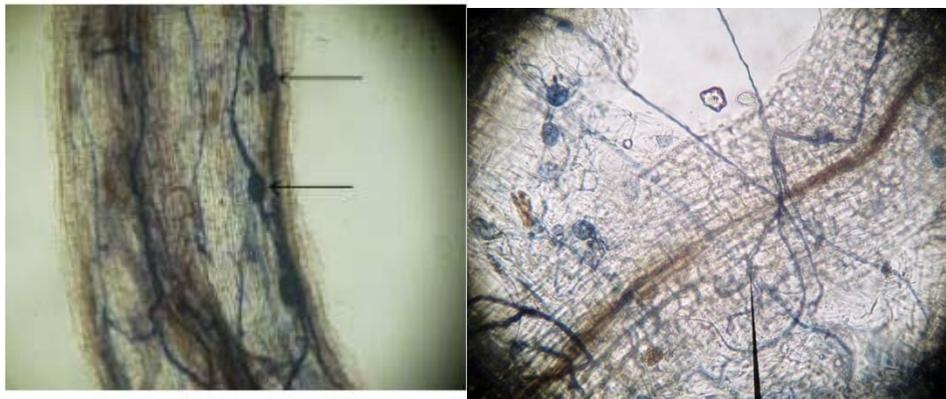


Figura 14. Colonización por hongos formadores de micorriza arbuscular

### 8.4 Análisis de componentes principales (ACP)

En el análisis de componentes principales (ACP) (Figura 15), se obtuvo que los 3 principales componentes explicaron el 73% de la varianza total de los datos.

El primer eje explicó el 34,52% de la varianza y las variables que más contribuyeron fueron la capacidad de intercambio catiónico (CIC, 0.82), la humedad (0.69), el sodio (Na, -0.68), el pH (-0.67) y el limo (-0.66). Por su parte el segundo eje explicó el 21,28% de la varianza y los factores que más contribuyeron fueron la arena (0.86), el limo (-0.60) es decir la estructura del suelo, la humedad (-0.49) y el potasio (K, -0.47). Por último, el tercer eje explicó el 17,08% de la varianza y los factores que más contribuyeron fueron el fósforo total (Ptotal, 0.79), el potasio (K, -0.47), el sodio (Na, 0.43) y el pH (0.42) (Anexo 3).

Además en la Figura 15, se observa que el limo se relaciona positivamente con el pH y la arena, mientras que negativamente con la capacidad de intercambio catiónico (CIC), por otro lado la arena se relacionó negativamente con el pH y el sodio, de manera positiva con el potasio y limo; la CIC está relacionada positivamente con el fósforo total y la humedad.

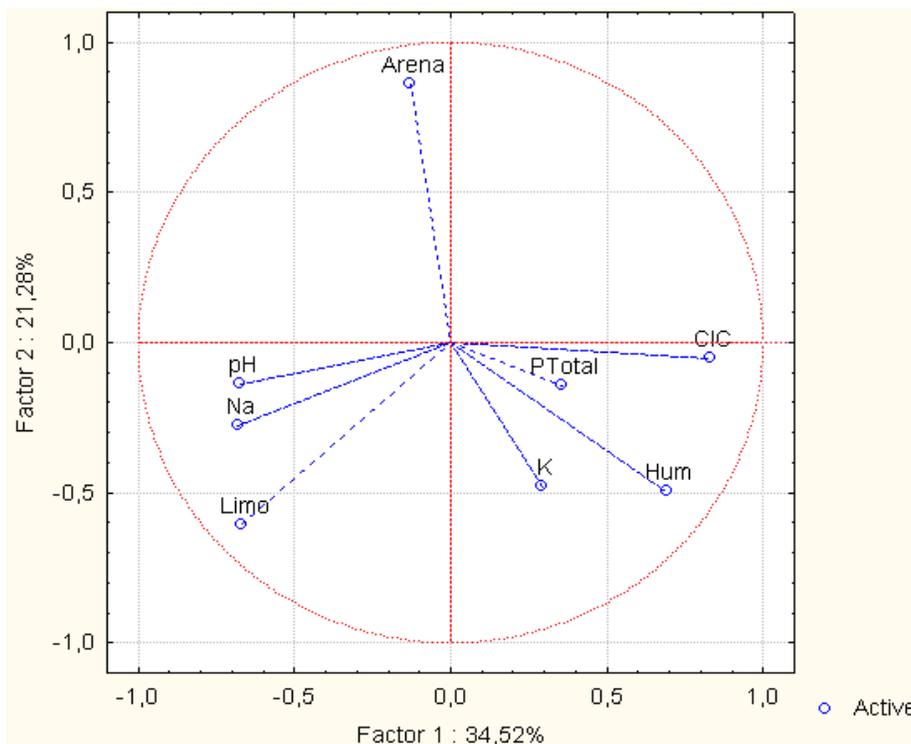


Figura 15. Proyección de los casos en el factor-plano (1x2). \*CIC: Capacidad de intercambio catiónico, Ptotal: fósforo total, Hum: Humedad, K: Potasio, Na: Sodio.

## **8.5 Análisis de varianza- covarianza**

Utilizando los modelos basados en ecuaciones estructurales se redujo la cantidad de parámetros, varianzas, covarianzas y correlaciones que determinan el modelo conceptual previo de las relaciones hipotéticas entre las variables edáficas, los HMA, HSP y el contenido nutricional, obteniendo así que a partir del modelo previo el ajuste del modelo final mostró un Chi-cuadrado ( $\chi^2$ ) de 38,327, con 23 grados de libertad lo cual muestra que el modelo se ajusta a la realidad, además la prueba de criterio de información de Akraike (AIC) demuestra que el valor del modelo 122,327 es menor a los valores obtenidos en el modelo saturado y el modelo de independencia, lo que brinda confianza en su obtención junto a una estimación relativa del conjunto de los parámetros de mayor influencia.

### **8.5.1 Relaciones entre hongos formadores de micorriza arbuscular, hongos solubilizadores de fosfatos, nutrición de las plantas y propiedades edáficas**

A partir de los parámetros definitivos obtenidos del análisis de varianza-covarianza, se confirmó la mayoría de las relaciones hipotéticas planteadas, donde los efectos directos, indirectos y totales del modelo permitieron determinar las posibles asociaciones entre parámetros edáficos con la colonización por hongos formadores de micorriza arbuscular (HMA), la abundancia de hongos solubilizadores de fosfato (HSP) y el fósforo foliar (Tabla 10). De las 16 variables evaluadas (arena, limo, arcilla, pH, carbono orgánico, capacidad de intercambio catiónico, Ca, Mg, K, Na, fósforo disponible, fósforo total, colonización por HMA, fósforo foliar, humedad y abundancia de HSP) se obtuvo que el sodio, limo, humedad, fósforo disponible, fósforo total, HSP y la colonización por HMA son los parámetros que influyen de manera indirecta sobre la primera variable respuesta “fósforo foliar”, mientras que el pH influye en forma directa.

Los rangos de contenido de fósforo foliar en las tres zonas muestreadas (Tabla 9) son similares entre la zona 1 correspondiente a Cundinamarca donde se encontró entre 0,02 a 0,02 y en la zona de Antioquia los contenidos fueron 0,02-0,03, mientras que en la Zona 3 referente al Magdalena de 0,02 a 0,12, los cuales son más altos a comparación de las otras zonas.

El ajuste de  $\chi^2$  (Tabla 10) permite tener una confiabilidad para predecir las variables respuesta, donde la mayoría de las posibles asociaciones propuestas entre las variables respuesta y las

edáficas fueron comprobadas, donde las variables de mayor influencia sobre la primera variable respuesta (objetivo 1), es decir el contenido de fósforo foliar son el pH, la colonización por HMA, el limo, el fósforo total y el sodio, con un ajuste  $r^2 = 0,298$ .

Tabla 10. Ajuste del modelo conceptual inicial con el modelo final ( $r^2$ ,  $\chi^2$ , probabilidad asociada “P”) y efectos estandarizados (directos, indirectos y totales) de Na=sodio, limo, humedad, pH, PDisponible=Fósforo disponible, PTotal= Fósforo total, HSP= Hongos solubilizadores de fosfato, ColHMA= Colonización por hongos formadores de micorriza arbuscular sobre las variables respuesta Pfoliar= Fósforo foliar, HSP y ColHMA.

VARIABLES RESPUESTA	Efecto	VARIABLES INFLUYENTES								AJUSTE DE MODELO		
		Na	Limo	Humedad	PH	PDisponible	PTotal	HSP	ColHMA	$r^2$	$\chi^2$	P
Pfoliar	Directo	-	-	-	0,324	-	-	-	0,450	0,298	38,327	0,023
	Indirecto	0,130	-0,174	0,094	-0,002	-0,064	-0,142	-0,005	-0,119			
	Total	0,130	-0,174	0,094	0,322	-0,064	-0,142	-0,005	0,331			
HSP	Directo	-	0,968	-0,955	0,385	-3,550	3,181	-	-	1,013		
	Indirecto	0,095	-0,975	0,906	-0,338	3,062	-2,890	-	0,243			
	Total	0,095	-0,007	-0,049	0,046	-0,488	0,291	-	0,243			
Colonización HMA	Directo	0,391	-0,511	0,270	-	-0,247	-0,382	-	-	0,950		
	Indirecto	-0,103	0,124	-0,061	-0,004	0,104	0,066	-0,011	-			
	Total	0,288	-0,386	0,209	-0,004	-0,064	-0,315	-0,011	-			

A partir del análisis de datos por modelos estructurales, para el segundo objetivo del trabajo se determinaron las posibles asociaciones entre los parámetros edáficos, físicos y biológicos (hongos de estudio) y el contenido nutricional (Tabla 10 y Figura 16), donde las variables respuesta fueron HMA y HSP. De esta manera, se obtuvo que para el caso de los hongos solubilizadores de fosfatos (HSP) los parámetros de mayor asociación positiva fueron el fósforo total, la colonización por hongos formadores de micorriza arbuscular y el sodio, mientras que de manera negativa está el fósforo disponible, además la variable respuesta abundancia de HSP presenta un ajuste en  $r^2 = 1,013$  mayor que las otras variables respuesta.

Para la segunda variable respuesta colonización por HMA se obtuvo un ajuste en  $r^2=0,950$  y se encontró una relación positiva del sodio de (0,391) y la humedad de (0,270), mientras que el limo (-0,386) y el fósforo total (-0,315) presentaron una mayor relación de manera negativa hacia la colonización por HMA.

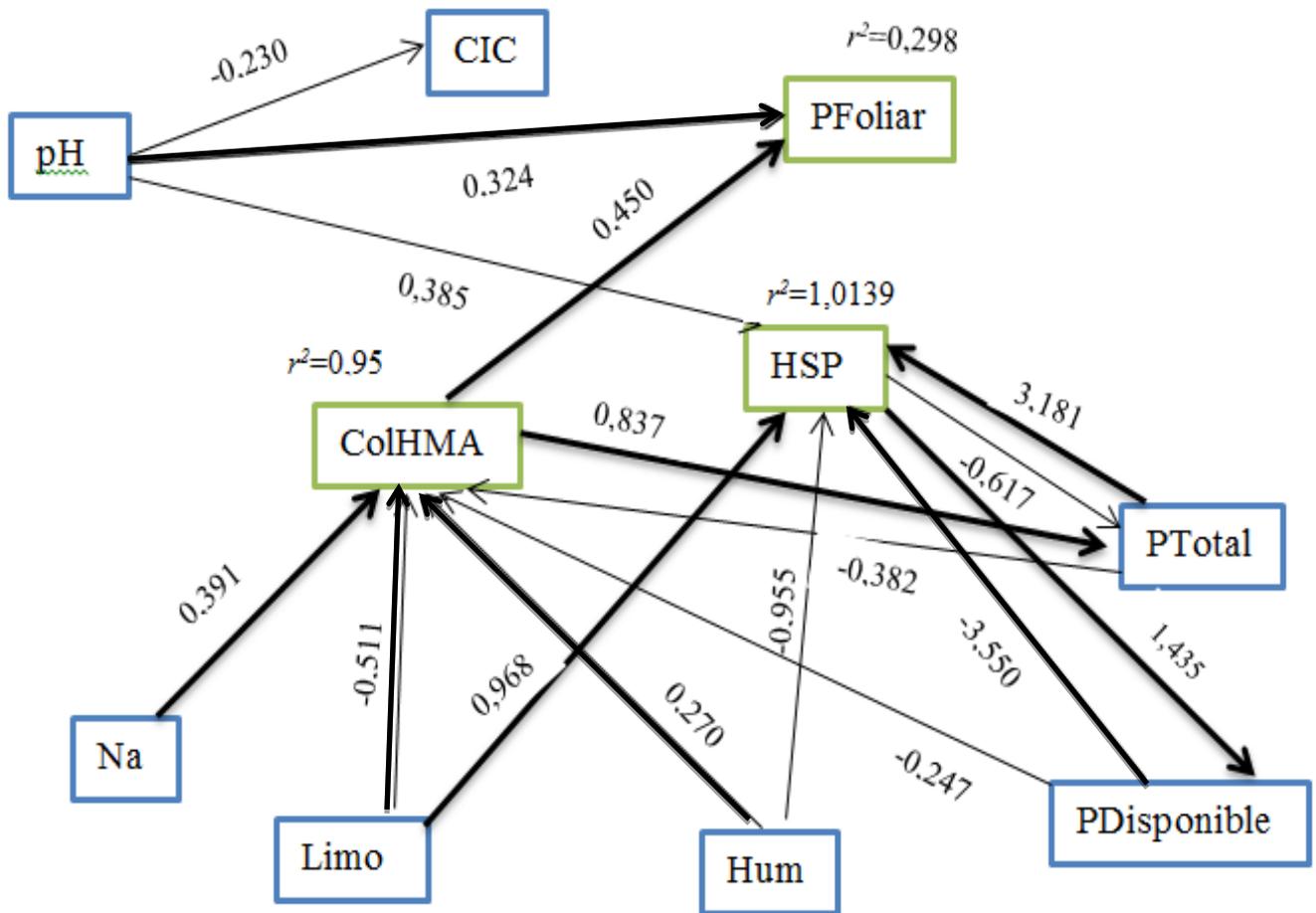


Figura 16. Modelo conceptual definitivo de las relaciones directas de mayor importancia en el estudio. Los números hacen referencia al valor de cada una de las asociaciones encontradas, las flechas gruesas hacen referencias a las asociaciones más representativas en el estudio. CIC= Capacidad de intercambio catiónico, PFoliar= Fósforo foliar, ColHMA= Colonización de Hongos formadores de micorriza arbuscular, HSP= Hongos solubilizadores de fosfato, PTotal= Fósforo total, Na= Sodio, Hum= Humedad y PDisponible= Fósforo disponible.

## 9. DISCUSIÓN

Los resultados del presente estudio, permiten observar que no existió homogeneidad entre las variables edáficas muestreadas (Tabla 10), lo cual puede ser atribuido a que los cambios en la cobertura y uso del suelo tienen efectos positivos y/o negativos importantes en el suelo y en las funciones ecosistémicas que este soporta, lo cual es más evidente en agroecosistemas intensivos (Matson, Parton, Power & Swift, 1997). Adicionalmente los contenidos de N y P, y su relación con la fertilidad del suelo (Matson *et al.* 1997), afectan de diferente forma a las comunidades microbianas (Bossio *et al.* 2005; Steenwerth *et al.* 2002; Yao, He, Wilson & Campbell, 2000).

El modelo a priori empleado para analizar las relaciones entre el fósforo foliar, los niveles de colonización por micorriza arbuscular, los conteos de hongos solubilizadores de fosfatos y algunos parámetros edáficos en cultivos de banano en Colombia, fue ajustado hasta obtener un  $\chi^2 = 38,327$ , lo cual acompañado de un  $P = 0,023$ , brinda un alto grado de confiabilidad. Lo que permite tener seguridad que las relaciones entre las variables en el modelo final se confirman con los datos reales (Arbuckle, 2010).

### **Primer objetivo de investigación:**

#### **Variables asociadas al contenido de fósforo foliar.**

El contenido de fósforo es explicado con un  $r^2$  de 0,298 y determinado principalmente por el pH y la colonización por hongos formadores de micorriza arbuscular, una menor influencia del fósforo total, limo y sodio, y una mínima influencia del contenido de humedad y fósforo disponible.

En el presente estudio los contenidos de fósforo foliar no fueron similares entre las tres zonas de estudio: Cundinamarca, Antioquia y Magdalena (0,02-0,02 ppm; 0,01-0,03 ppm; 0,02-0,12 ppm respectivamente, Tabla 9), siendo superiores en el Magdalena, adicionalmente están asociados en forma positiva principalmente al nivel de colonización por HMA y pH (0,450 y 0,324 respectivamente, Figura 16), lo que indica que pequeñas variaciones de pH tienen influencia

positiva en el contenido de fósforo foliar (Pfoliar), el cual es soportado por la colonización por HMA e indicando que la absorción de P no se realiza de forma directa por la planta, así se tengan altos contenidos de P disponible en el suelo.

El pH con un coeficiente de ruta de 0,322 (Figura 16, Tabla 10) con el fósforo foliar, indica una relación positiva en el rango de valores en el cual se encuentra los cultivos de banano evaluados (4,3-7,6), al igual que se evidencia en el estudio de Van Raij, Cantarella, Quaggio & Prochnow (2009), quienes reportan dicha asociación, demostrándolo con cuatro experimentos de campo en el estado de Sao Paulo, Brasil al aplicar cal para variar el pH del suelo, en los cuales se observó un incremento significativo en la concentración de fósforo foliar en frijol, girasol y soya; además como lo afirman Macías, Valdés, García, Guízar & Taylor en el 2002 tanto las condiciones del suelo como el tipo de cultivo influyen entre las relaciones del suelo y la acumulación de nutrimentos en los tejidos foliares.

Por su parte, la asociación entre la colonización por HMA y el fósforo foliar presento un coeficiente de ruta total positivo (0,331, Tabla 10), lo cual puede estar relacionado con un grado de dependencia micorrícica de esta especie (Sieverding, 1991), en la cual la raíz micorrizada favorece el crecimiento y producción, a su vez la absorción de iones menos móviles como el fósforo, por lo tanto esta asociación se mantiene en altas o bajas concentraciones de fósforo edáfico; este mismo efecto se observó en los resultados de Millaleo, Montecinos, Rubio, Contreras & Borie (2006), quienes muestran que las diferencias encontradas para el fósforo foliar en tres cultivos de estudio (Pradera, frijol y trigo) estaban relacionadas con la colonización por HMA, mientras que en otros casos la colonización radical está más relacionada con otros parámetros de crecimiento que con el contenido de fósforo foliar. Los estudios de Rodríguez, Nieves, Melgarejo & Muñoz (2009), mostraron que el P en hojas y/o vástagos de las plantas de *Hevea brasiliensis* inoculadas con HMA en viveros, no presentaban un aumento de la concentración de fósforo foliar pero si una respuesta positiva del crecimiento de las plántulas, en suelos con contenidos medios de fósforo disponible.

El fósforo disponible en el suelo no presentó una relación directa hacia el contenido de fósforo foliar sino de forma indirecta y medida por los HMA (-0,119, Tabla 10), ejerciendo una influencia negativa, este coeficiente es producto de la relación (-0.247 X 0.450) en la interacción

PDisponible-ColHMA-Pfoliar, en donde fósforo disponible- colonización por HMA tienen un coeficiente de ruta de -0,247 (Figura 16) lo cual entra en concordancia con la relación establecida en diferentes estudios (Duke, Jackson & Caldwell, 1994; Medeiros, Clark & Ellis, 1994; Ryan, Chilvers & Dumaresq, 1994; Wang *et al.* 1993; Smith, Dickson, Morris & Smith, 1994; Jackson, Franklin & Miller, 1972; Velandia, 2006) en donde se afirma que altos contenidos de P disponible en el suelo se asocian de manera negativa con los HMA.

De acuerdo a la Tabla 10, el contenido de P foliar está influenciado indirectamente con los contenidos de humedad edáfica, pero con poca influencia (0,094). En el presente estudio los niveles de humedad fueron disímiles (Tabla 9), siendo mayores en Cundinamarca y menores en Magdalena (Tabla 9), lo que concuerda con los resultados obtenidos. No se ha encontrado reportes de literatura que relacionen el contenido de humedad, sodio (Na) y limo sobre los niveles de P foliar, pero si están relacionados con los niveles de colonización radical (Tabla 10, Figura 16), lo cual es objeto del siguiente numeral que corresponde al segundo objetivo de investigación.

**Segundo objetivo de investigación: Asociaciones entre la colonización por HMA, abundancia de HSP y algunas propiedades edáficas en los cultivos de banano muestreados.**

**Colonización por hongos formadores de micorriza arbuscular.**

Los niveles de colonización por HMA son explicados con  $r^2=0.950$ , principalmente por las variables fósforo total, limo, sodio y humedad, con una mínima influencia del pH, fósforo disponible y las poblaciones de HSP.

Algunos estudios indican una relación entre la granulometría del suelo (arena, arcilla y limo), con los niveles de colonización radical debido a la relación intrínseca de la granulometría con el contenido de humedad, la aireación y la porosidad, los cuales crean condiciones para la difusión de nutrientes y contribuyen a la retención de agua (Finlay, 2008; Six, Bossuyt, Degryze & Denef, 2004; Six, Frey, Thiet & Batten, 2006); esto pone en evidencia la necesidad de estudiar como la granulometría puede afectar la colonización por hongos formadores de micorriza arbuscular, el cual tiene un efecto total negativo.

El sodio presentó una relación total positiva (0.288, Tabla 10), hacia la colonización por HMA, lo cual es acorde con las observaciones de Pérez & Peroza (2010), quienes reportan mediante el análisis de componentes principales (ACP) que la colonización por HMA, está directamente relacionada a los valores de los elementos intercambiables potasio (K), sodio (Na) y zinc (Zn) en los suelos. Al alcanzar altas concentraciones de Na los HMA causan un efecto tampón en las plantas asociadas, produciendo una mayor tolerancia, este efecto de las micorrizas en suelos salinos se ha evidenciado en incrementos en la colonización y en el área foliar en plantas de uchuva (*Physalis peruviana*) (Miranda, Fischer, & Ulrichs, 2011) y en el incremento del peso seco de ramas y raíces en plantas de banano (Yano-Melo, Saggin, & Costa, 2003) y olivos (Porrás-Soriano, Soriano-Martín, Porrás-Piedra, & Azcón, 2009). Sin embargo, en el presente estudio se encontraron en general bajos promedios del contenido de Na en los sistemas de producción muestreados en Cundinamarca (0,2-0,4), Antioquia (0,3-0,4) y Magdalena (0,3-1,0), con excepción de una de las fincas con valores de 1,01 lo que favorece una mayor colonización por HMA, lo que coincide con el hecho de ser la finca con mayores porcentajes de colonización de la zona; de esta manera, se evidencia que la colonización por HMA tiene una asociación directa con los contenidos de Na, permitiendo que su presencia y colonización puedan aliviar algunos efectos negativos de altos contenidos de sodio.

La humedad mostró un coeficiente de ruta directo de 0,270 y total de 0,209 con la colonización radicular por HMA, en el presente estudio los contenidos de humedad en las tres zonas muestreadas Cundinamarca, Antioquia y Magdalena (20,0-30; 22,6-28,7; 15,1-22,8 respectivamente, Tabla 9), son bajos debido posiblemente a las condiciones de sequía en la época de muestreo, mostrando una relación directa entre las dos variables, ya que los niveles óptimos de humedad influyen en la capacidad de colonización por HMA y un exceso o déficit de este factor afectan negativamente la presencia de los hongos formadores de micorriza arbuscular, lo cual es corroborado por Sánchez *et al.* (2011) en cultivos de aguacate, y según Miller (2000), se presentan mayores tasas de colonización en suelos húmedos que en suelos muy secos o inundados. Según Johson, Tilman & Wedin (1992), los cambios permanentes en el ambiente edáfico como humedad, temperatura y disponibilidad de nutrientes han mostrado ejercer un control en la comunidad y colonización por HMA.

El contenido de fósforo total presentó una relación negativa hacia la colonización por HMA con un coeficiente de ruta total (-0,315, Tabla 10), en los suelos muestreados se presentó contenidos de fósforo total altos (>40 ppm, IGAC, 2014) en rango (582-1673 ppm), bajo tales condiciones no se han encontrado reportes de relación entre estos dos factores, ya que la mayoría de los estudios evalúan la asociación en suelos con bajos contenidos de P disponible y no con el fósforo total. Rodríguez, Crespo & Rodríguez en el 2002 afirman que generalmente el proceso de micorrización se ve inhibida por altos contenidos de fósforo en el suelo, Orozco, Sarmiento, Gutiérrez & Andrade (2010) evaluaron la colonización por HMA en plantas de aguacate (*Persea americana* L.) encontrando una relación negativa entre los contenidos de fósforo total del suelo respecto al porcentaje de colonización de raíces por HMA de los géneros *Glomus* y *Acaulospora*, por lo tanto, en el presente trabajo en suelos bananeros de Colombia con altos contenidos de P, se demuestra una relación negativa entre estos dos parámetros.

En la zona del Magdalena se encontró mayor riqueza de hongos formadores de micorriza arbuscular (HMA), seguido por Antioquia y Cundinamarca (55, 33 y 32 morfoespecies respectivamente, Figura 11), la presencia de especies no comunes puede ser atribuido como lo afirman Hendrix, Guo & Z-Q (1995) a que la composición de especies de HMA puede ser una respuesta a los cambios en la comunidad de plantas presentes en cada zona debido a la naturaleza obligada de los simbioses y su respuesta ante las condiciones ambientales y edáficas, como se evidencia en el presente estudio donde cada una de las zonas muestreadas tiene sus propias características (Tabla 9), es así como las Zonas 2 y 3 son reconocidas por su alta productividad bananera intensiva en forma de monocultivo, mientras que la Zona 1 correspondiente a Cundinamarca, donde se presenta una producción mediana y pequeña en asociación con otros cultivos asociados, lo que anudado a las diferentes prácticas que se realizan en los sistemas agrícolas, puede generar cambios en las poblaciones de HMA (Kurle & Pflieger, 1994, Schalamuk, Velasquez, Chidichimo & Cabello, 2006), de manera que la diversidad de estos hongos puede sufrir alteraciones por el manejo agrícola intensivo (Oehl *et al.* 2004, Lovera & Cuenca 2007).

La presencia de 15 morfoespecies comunes para las tres zonas, puede indicar adaptación de estas ante diferentes condiciones ambientales, mientras que las especie no comunes pueden ser

especies más sensibles a condiciones del entorno (Oehl *et al.* 2004). En el presente estudio, se esperaría una mayor riqueza de HMA en la zona de Cundinamarca, zona que presenta una producción a pequeña escala y los cultivos de banano se encuentra asociado a otros cultivos, principalmente de especies agrícolas y forestales; sin embargo, la mayor riqueza de HMA se encontró en la zona del Magdalena, una zona de alta productividad bananera en Colombia y con sistemas de producción en monocultivo, por lo tanto el precepto de mayor diversidad edáfica asociada a mayor diversidad vegetal (Sieverding, 1991), pierde su valor en el presente contexto y lleva a cuestionarse la posibilidad de que en sistemas bananeros intervenidos con alto contenido de P, las funciones de los simbioses serán suplidos por diferentes consorcios.

En el presente estudio se encontraron porcentajes de colonización entre 13,2 y 32,9% en las diferentes zonas de estudio, los cuales en todos los casos son inferiores a los obtenidos por los investigadores en banano Osorio, Sánchez & Molano (2008), con 48,7% con plantas micropropagadas de banano (*Musa* AAA cv Gran Enano); Oliveira, Oliveira & Figueiredo (2003) con 60,7%, 55,2% y 53,6 en tres de los principales cultivares de banano en Brasil, pertenecientes al grupo AAB (Maçã, Pacovan y Plata respectivamente); Mnyazi *et al.* (2012), en Maragua Kenya, con 59,6%; Usuga, Catañeda, *et al.* (2008a), con 37,8%, en plantas trampa y 48,7% en plántulas de banano, finalmente Usuga, Castañeda, *et al.* (2008b), con 32,7%, y con adición de materia orgánica hasta un 37,6%; lo cual puede estar asociado a mejores condiciones de cultivo en cada localidad y condiciones controladas en las plantas trampa, siendo mejores que las presentes condiciones naturales en los sitios de muestreo en el presente estudio.

### **Hongos solubilizadores de fosfatos.**

La abundancia de hongos solubilizadores de fosfatos (HSP), presento un  $r^2=1,03$ , principalmente por las variables: colonización por HMA, fósforo disponible y total, con una menor medida por el contenido de sodio (Na) y con una mínima influencia del contenido de humedad, limo y el pH.

Como se mencionó anteriormente, para las plantaciones de Cundinamarca, Antioquia y Magdalena se presentaron contenidos de fósforo disponible (55,1-220,4; 53,5-113,0 y 155,5-243,1 respectivamente), los cuales en todos los casos son altos de acuerdo a las tablas de referencia del IGAC (>40 ppm). La disponibilidad de fósforo en el suelo, depende de fuentes

orgánicas e inorgánicas, de la descomposición de la materia orgánica, la fertilización fosfatada o solubilización biológica (Posada *et al.* 2012). En el presente trabajo muy probablemente es debido a las sobre fertilizaciones de síntesis química en las dos zonas bananeras muestreadas de cultivo convencional (Antioquia y Magdalena), y en el caso de Cundinamarca a la fertilización con productos de síntesis química mezclada con fertilización orgánica.

Se encontró, una relación total negativa (-0,488, Tabla 10) entre el fósforo disponible y los HSP, la cual es explicada principalmente por una relación simultánea positiva de HSP hacia el fósforo disponible y una negativa de P disponible hacia los HSP (Figura 16), los cuales compensan sus efectos, indicando que probablemente los hongos con potencial fosfato solubilizador están ejerciendo un rol de solubilizadores (efecto positivo), pero los altos contenidos de P disponible facilitan el crecimiento de todos los grupos fúngicos, indiferentes de su función (efecto negativo). Torres & Lizarazo (2006) afirman que la disponibilidad de fósforo en los suelos en algunos casos puede estar determinada por la actividad de microorganismos solubilizadores, su abundancia y eficiencia, cuando hay una situación de deficiencia por este elemento; sin embargo situaciones de exceso de fósforo total y disponible, donde su rol como solubilizadores de P es suplida por las existencias del entorno, como en el presente estudio, no resultan favorables para las poblaciones de HSP.

Por otro lado, en cuanto la mayor presencia de HSP, se asoció con la mayor colonización por HMA (0,243 - Tabla 10), aunque no presentó un efecto directo (Tabla 10). Tanto los HSP (Moratto, Martínez, Valencia & Sánchez, 2005), como los HMA (González-Chávez, Gutiérrez-Castorena & Wrigh, 2004; Borie, Rubio & Morales, 2008; Borie, Rubio, Morales & Castillo, 2000) tienen efectos positivos en la estructura del suelo, quizás la presencia de uno de estos favorezca el posicionamiento del otro, mediante mejoramiento de condiciones de humedad, aireación y descomposición de la materia orgánica.

La humedad mostró un alto coeficiente de ruta directo (-0,955), cuyo efecto prácticamente es anulado por los efectos indirectos (0,906), arrojando una baja asociación total (-0,049, Tabla 10). Al observar la Tabla 9, se detalla que la relación entre humedad y presencia de HSP cambia de plantación a plantación, lo que hace suponer que se trata de casos particulares y por lo tanto la relación corresponde a una covarianza y no a una correlación; este efecto puede estar relacionado

con la granulometría del suelo y en este caso a los contenidos de limo, los cuales presentan un comportamiento similar pero en sentido inverso, anulándose el efecto total de este factor (Tabla 10). Con respecto a la humedad, los estudios realizados por Vera, Pérez, & Valencia (2002b) mencionan que la disminución del contenido de humedad tiende a disminuir el estado micelial y por lo tanto, los hongos solubilizadores de fosfatos; mientras los estudios de Posada *et al.* 2012 reportan que la asociación entre estos dos parámetros puede cambiar radicalmente en cuanto la humedad propicia el crecimiento fúngico en comparación a la época seca

Mientras que en el caso de los contenidos de limo se observa que este tiene un coeficiente de ruta en relación positiva (0,968, Figura 16, Tabla 10) con las poblaciones de HSP, lo cual se debe a la presencia de espacios porosos en los limos donde se pueden asentar las hifas de hiphomicetos, entre ellos los solubilizadores de fosfatos (Six *et al.* 2004); por su parte la relación negativa que anula la relación directa se debe a los efectos indirectos (-0.975, Tabla 10) asociados a los altos contenidos de P total y disponible (Figura 16); al haber altos contenidos de P total en el suelo, existe una alta solubilidad del P al sobrepasar las capacidades de retención de las arcillas (Fassbender, 1987), lo cual hace que no sea requerida su función como solubilizadores de fosfatos para hacer el fósforo mineral disponible.

En el presente estudio se encontraron HSP principalmente de los géneros *Penicillium*, *Paecilomyces*, *Alysidium*, *Humicola*, *Fusarium*, *Aureobasidium*, *Coniothyrium* y *Aspergillus*, este último ha sido reportado como uno de los géneros más eficientes solubilizando fosfatos debido a su alta actividad de fosfatasas (Tarafdar & Rao, 1996); estos resultados son similares a los reportados por Cao, You & Zhou (2002), los cuales obtuvieron en plantas de banano (*Musa acuminata*) aislamientos de hongos endófitos como *Aureobasidium* sp., *Penicillium* sp y *Aspergillus* sp en las hojas de la planta, al igual que también se encontraron los géneros *Paecilomyces* y *Fusarium*, a partir de muestras de rizósfera. Esto hace pensar que las poblaciones de solubilizadores a pesar de ser afectadas negativamente por altos contenidos de P, siguen vigentes y con un alto potencial de solubilización.

Las poblaciones de HSP constituyen 0,1- 0,5% de los hongos totales en el suelo (Khan, Zaidi, Ahemad, Oves & Wani, 2010) y en este caso no se presentaron morfoespecies en común entre las tres zonas (Figura 13), quizás debido a escasas poblaciones en este entorno, sin embargo, su presencia puede deberse a la existencia de micro hábitats rizósfericos y condiciones

edafoclimáticas específicos (Vera. Pérez & Valencia, 2002b), ya que muchos de éstos pueden estar realizando además función como saprobios.

El efecto de todas las variables edáficas y biológicas sobre las variables respuesta: fósforo foliar, hongos formadores de micorriza arbuscular y hongos solubilizadores de fosfato, no se pueden analizar y evaluar sin tener en cuenta todas las posibles asociaciones entre ellas, y aunque es importante tener presente las particularidades de parámetros edáficos en el cultivo de banano, hay patrones que se pueden comprender al estudiar el conjunto de interacciones en varios entornos agrícolas y no basados en estudios de caso. A través del tiempo, se ha observado el deterioro de los suelos y la sobre explotación de los recursos, por lo cual se ha generado una preocupación por la conservación de los suelos y la biodiversidad en sistemas de producción, para ello es importante implementar mecanismos agroecológicos como los biofertilizantes, pero no sin una visión de lo que sucede con las poblaciones naturales de microorganismos benéficos como HMA y HSP en este entorno.

## 10. CONCLUSIONES

- En cultivos de banano, el contenido de fósforo foliar está determinado en gran medida y de forma positiva por pequeñas variaciones del pH y de la colonización micorrizal, de la cual es altamente dependiente aún en condiciones de alta disponibilidad de P, presentando una relación negativa; por otro lado, se encuentra poco asociado a los contenidos de humedad y a las concentraciones de P disponible en el suelo, con una relación indirecta.
- En condiciones de altas concentraciones de P como en los cultivos de banano, los niveles de colonización por micorrizas están asociadas de forma positiva principalmente con la humedad y el sodio y de forma negativa con los contenidos de limo y fósforo total, mientras el P disponible no tiene influencia alguna.
- Los conteos de hongos solubilizadores de fosfatos (HSP) se asocian positivamente con los contenidos de P total y con la colonización por HMA, sin embargo se asocian negativamente con los contenidos de P disponible, posiblemente debido a que sigan ejerciendo una función como solubilizadores de P.
- El precepto de mayor diversidad edáfica asociada a mayor diversidad vegetal pierde su valor en el presente contexto y lleva a cuestionarse la posibilidad de que en sistemas bananeros intervenidos con alto contenido de P, las funciones de los simbiontes serán suplidos por diferentes consorcios.
- La presencia, diversidad y abundancia de los dos hongos de estudio (HMA y HSP), en los sistemas de producción de banano muestreados, se encuentran poco influenciados por su establecimiento y/o asociación con otros cultivos (Monocultivo o policultivo).

## 11. RECOMENDACIONES

- Realizar más aislamientos e identificación de HMA y HSP presentes en un sistema productivo, sin trabajar con muestras compuestas, teniendo en cuenta todas las particularidades de los parámetros tanto edáficos como biológicos que influyen en este, bajo una visión holística que permita establecer asociaciones entre estos.
- Se recomienda mejorar el manejo del suelo y del sistema productivo de banano, asociándolo a otros sistemas de producción, aplicar coberturas vegetales e implementar una fertilización biológica, con el fin de garantizar un desarrollo sostenible y conservación tanto de recursos naturales como de la biodiversidad.
- Es recomendable la adopción de prácticas agroecológicas con el fin de elaborar un proceso de transición, que garantice mejorar tanto las condiciones de los sistemas productivos como la calidad de vida de cada una de las familias de agricultores.
- En el presente estudio, se encontraron asociaciones importantes con algunos parámetros edáficos, por lo cual es recomendable tener en cuenta los aspectos físico-químicos sobre la influencia en la colonización por HMA, abundancia de HSP y contenido de fósforo foliar, debido a que las variaciones en algunos parámetros edáficos son propias de cada zona, y estos hongos se adaptan a condiciones edafoclimáticas en un área determinada

## 12. BIBLIOGRAFÍA

- Abdel-Fattaha, G., El-Haddadb, S., Hafezc, E., & Rashadd, Y. (2011). Induction of defense responses in common bean plants by arbuscular mycorrhizal fungi. *Microbiological Research* 166- science direct, 268- 281.
- Aciego, J.C. & Brookes P.C. (2009). Substrate inputs and pH as factors controlling microbial biomass, activity and community structure in an arable soil. *Soil Biol. Biochem.* 41: 1396-1405.
- Acosta, A. M., & Salinas, D. G. (2011). Dinámica del Crecimiento y Desarrollo del Banano (Musa AAA Simmonds cvs. Gran Enano y Valery). *Rev.Fac.Nal.Agr.Medellín* 64(2), 6055-6064.
- Akhtar M.S & Siddiqui Z.A. (2009). Effects of phosphate solubilizing microorganisms and Rhizobium sp. on the growth, nodulation, yield and root-rot disease complex of chickpea under field condition. *Afr J biotechnol* 8:3489–3496
- Akinrinde, E.A., O.S. Bello, K.O. Ayegboyin & Iroh, L. (2005). Added benefits of combined organic and mineral phosphate fertilizers applied to maize and melon. *J. Food Agri. Environ.*, 3: 75-80.
- Akinrinde, E.A. & Okeleye K,A. (2005). Short and long term effects of sparingly soluble phosphates on crop production in two contrasting Nigerian alfisols. *W. Afr. J. Appl. Ecol.*, 8: 141-150.
- Akinrinde, E. A. (2006). Strategies for Improving Crops' Use-Efficiencies of Fertilizer Nutrients in Sustainable Agricultural Systems. *Pakistan Journal of Nutrition* 5 (2), 185-193.
- Alagawadi A,R & Gaur A,C. (1992). Inoculation of Azospirillum brasilense and phosphate-solubilizing bacteria on yield of sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] in dry land. *Trop Agric* 69:347–350
- Alam M.M & Ladha J.K. (2004). Optimizing phosphorus fertilization in an intensive vegetable–rice cropping system. *Biol Fertil Soils* 40:277–283

- Alexander, M. (1987). Introduction of soil microbiology. New York. Ed. Wiley and Sons. Pag 83-88
- Altieri, M., & Nicholls, C. I. (2000). *AGROECOLOGÍA- Teoría y práctica para una agricultura sustentable 1º Edición. Serie de textos Básicos para la formación ambiental*. México D.F: Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.
- Anacafé, N. (2004). *Cultivo de Banano*. Programa de Diversificación de Ingresos en la Empresa Cafetalera.
- Andrade-Linares, D. R., Grosch, R., Restrepo, S., Krumbein, A., & Franken, P. (2011). Effects of dark septate endophytes on tomato plant performance. *Mycorrhiza*, 21(5), 413–22. <http://doi.org/10.1007/s00572-010-0351-1>
- Antoninka, A., Wolf, J.E., Bowker, M., Classen, A.T & Johnson, N.C. (2009). Linking above- and belowground responses to global change at community and ecosystem scales. *Glob. Chang. Biol.* 15: 914-929.
- Arias, P., Dankers, C., Liu, P., & Pilkauskas, P. (2004). *La Economía mundial del banano 1985-2002*. Roma : Dirección de productos básicos y comercio. Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación. FAO.
- Arbuckle, J. L. (2010). Amos 18 User's Guide. Methods. Chicago, USA: SPSS. Retrieved from <http://www.mediafire.com/?d3jhmxmrigt>.
- Bååth, E. (1996). Adaptation of soil bacterial communities to prevailing pH in different soils. *FEMS Microbiol. Ecol.* 19: 227-237.
- Banco Agrario de Colombia, Regional Costa, Resumen costos de producción 2008, Bogotá.
- Bates, R. G. (1954). *Determination of pH: theory and practice* (1st ed.). New York
- Berdugo, S. E., & López, N. F. (2010). EFECTO DE HONGOS MICORRIZICOS ARBUSCULARES EN PLÁNTULAS DE *Elaeis guineensis* (Palmeaceae) CON ALTO NIVEL DE P EN EL SUELO. (ABC) *Acta biológica Colombiana.*, Vol. 15 N.º 1., 105 - 114.

- Bhatia, N. P, Sundari, K & Adholeya, A. (1996). Diversity and selective dominance of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi. In: K. G. Mukerji (Ed). *Concepts in Mycorrhizal Research*. Kluwer Academic Publishers. p. 133-178.
- Bills, G. F., Mueller, G. M., & Foster, M. S. (2004). *Biodiversity of Fungi: Inventory and Monitoring Methods*. California, EEUU: Elsevier.
- Blancof, F & Salas, E. (1997). Micorrizas en la Agricultura: Contexto Mundial e Investigación Realizada en Costa Rica. *Agronomía Costarricense*.;21(1): 55-67.
- Blaszkowski, J. (2015). *Especies de micorriza* . Recuperado el 10 de Noviembre de 2014, de <http://www.agro.ar.szczecin.pl/~jblaszkowski/Species%20descriptions%20of%20AMF.htm>
- Blomme, G., Swennen, R., Ortiz, R., & Tenkouano, A. (2006). Sistema radical y crecimiento de brotes de banano (*Musa spp.*) en dos zonas agroecológicas de Nigeria. *Revista internacional sobre bananos y plátanos. InfoMusa Vol 15 N°1-2* , 18-23.
- Bojórquez, A. D., Gutiérrez, C. G., Báez, R. C., Sánchez, M. Á., Montoya, L. G., & Pérez, E. N. (2010). Biofertilizantes en el Desarrollo agrícola de México. *Revista de Sociedad, Cultura y Desarrollo Sustentable enero-abril*Vol. 6, Número 1 , Sinaloa. pp. 51-56 .
- Borie, F., Rubio, R., Morales, A., & Castillo, C. (2000). Relación entre densidad de hifas de hongos micorrizógenos arbusculares y producción de glomalina con las características físicas y químicas de suelos bajo cero labranza. *Revista Chilena de Historia Natural v.73 n.4 Santiago dic*, 749-756.
- Borie, F., Rubio, R., & Morales, A. (2008). Hongos micorrícicos arbusculares y agregación de suelo. *R.C.Suelo Nutr. Veg.* 8 (2)- *J. Soil Sc. Plant Nutr*, 9-18.
- Bossio, D.A., Girvan, M.S., Verchot, L., Billimore, J., Boreli, T., Albrech, A & Sscow, K.M. (2005). Soil Microbial community response to land use change in an Agricultural Landscape of Western Kenya. *Microbial Ecology*, 49(1), 50-62
- Bouyoucos, G. J. (1951). A recalibration of the hydrometer method for making mechanical analysis of soil. *Agronomy Journal*, 43, 435–438.

- Bray, R. H., & Kurtz, L. T. (1945). Determination of total, organic and available forms of phosphate in soils. *Soil Sei*, 59, 39–45.
- Cabello, M., Irrazabal, G., Bucsinszky A.M., Saparrat, M & Schlamuk, S. (2005). Effect of an arbuscular mycorrhizal fungus, *Glomus mosseae*, and a rockphosphate-solubilizing fungus, *Penicillium thomii*, on *Mentha piperita* growth in a soilless medium. *J. Basic Microbiol.* 45: 182-189.
- Cadena, A. C. (2009). *Estudio de factibilidad para la producción y comercialización de banano (Musa sp.), variedad gran enano Cavendish, en Quevedo, provincia de Los Ríos. Cumbayá : Universidad de San Francisco Quito y Colegio de agricultura, alimentos y nutrición. Departamento de Agroempresas .*
- Cao, L., You, J. & Zhou, S. (2002). Endophytic fungi from *Musa acuminata* leaves and roots in South China. *World Journal of Microbiology and Biotechnology; Vol 18, Issue 2*, pp 169-171.
- Chabot, R., Antoun, H. & Cescas M. P. (1993). Stimulation de la croissance du maïs et de la laitue romaine par des microorganismes dissolvant le phosphore inorganique. *Canadian Journal of Microbiology*, 39: 941-947.
- Chabot, R. (1996). Growth promotion of maize and lettuce by phosphate-solubilizing *Rhizobium leguminosarum* biovar. *Phaseoli*. *Plant and Soil*, 184: 311-321
- Chakraborty, B., Chakraborty, U., Sha, A., Sunar, K & Dey, P. (2010). Evaluation of phosphate solubilizers from soils of North bengal and their diversity analysis. *World Journal of Agricultural Sciences* 6(2):195-200.
- Champion, J & Sioussaram, D. (1970). L'enracinement du bananier dans les conditions de la station de Neufchâteau (Guadeloupe). *Fruits* 25: 847- 859
- Chuang, C.-C., Kuo, Y.-L., Chao, C.-C., & Chao, W.-L. (2007). Solubilization of inorganic phosphates and plant growth promotion by *Aspergillus niger*. *Biol Fertil Soils* 43. *Springer-Verlag* , 575–584.

- Chung, H., Park, M., Madhaiyan, M., Seshadri, S., Song, J., & Cho H, Sa T. (2005). Isolation and characterization of phosphate solubilizing bacteria from the rhizosphere of crop plants of Korea. *Soil Boil Biochem* 37:1970–1974
- Cifuentes, E. L., & Espinosa, P. A. (2008). *Aislamiento e identificación de Hongos filamentosos de muestras de suelos de los paramos de Guasca y Cruz Verde*. Bogoá D,C: Pontifica Universidad Javeriana, Facultad de Ciencias, Microbiología Industrial.
- Clark, C.A., Zeto, S.K & Zobel, R.W. (1999a). Arbuscular mycorrhizal fungal isolate effectiveness on growth and root colonization of *Panicum virgatum* in acidic soil. *Soil. Biol. Biochem.* 31:1757-1763.
- Clark, C.A., Zobel, RW & Zeto, S.K. (1999b). Effects of mycorrhizal fungus isolates on mineral acquisition by of *Panicum virgatum* in acidic soil. *Biol. Fertil. Soil.* 9:167-196.
- Colozzi Filho, A & Cardoso, E. (2000). Detecção de Fungos Micorrízicos Arbusculares em Raízes de Cafeeiro e de Crotolária Cultivada na Entrelinha. *Pesq Agrop Bras.* 35(10): 2033-2042.
- Curl, E. A. & Truelove, B. (1986). *The rhizosphere*. Springer-Verlag, Germany. 288 p.
- Dane, Censo General 2005, Bogotá.
- Delvaux, B. & Guyot, P. (1989). Caracterisation del`enracinement du bananier au champ. Incidences sur les relations sol- plante dans les bananeraies intensives de la Martinique. *Fruits* 44 (12): 633- 647
- Díaz, A., Cayón, G., & Mira, J. J. (2007). Metabolismo del calcio y su relación con la "mancha de madurez" del fruto de banano. Una revisión. *Agronomía Colombiana* 25(2), 280-287.
- Dix, N.J. & Webster, J. (1995). *Fungal Ecology*. Chapman and Hall, Londres, Inglaterra.
- Domsch, K. H., Gams, W. & Anderson, T.H. (2007). *Compendium of soil fungi*. (2, Ed.) Eching: IHW-Verlag.
- Duke, S., Jackson, R & Caldwell, M. (1994). Location of mycorrhizal arbuscule frequency in enriched soil micorosites. *Canadian Journal of Botany* 72. 998-1001.

- Espinosa, J., & Mite., F. (2002). *Estado actual y futuro de la nutrición y fertilización del banano*. (Quito y Quevedo) Ecuador: Instituto de la Potasa y el Fósforo (INPOFOS)- Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias.
- Ezz, T., Aly, M., Saad, M., & El-Shaieb, F. (2011). Comparative study between bio-and phosphorus fertilization on growth, yield, and fruit quality of banana (*Musa spp.*) grown on sandy soil. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 1-10.
- Fankem, H., Nwaga, D., Deubel, A., Dieng, W & Merbach, W. (2006). Occurrence and functioning of phosphate solubilizing microorganisms from oil palm tree (*Elaeis guineensis*) rhizosphere in Cameroon. *African Journal of Biotechnology* y 5 (24): 2450-2460.
- Finlay, R.D. (2008). Ecological aspects of mycorrhizal symbiosis: with special emphasis on the functional diversity of interactions involving the extraradical mycelium. *J. Exp. Bot.* 59, 1115–1126. doi:10.1093/jxb/ern059
- Gamboa, W. A. (2002). *Balance de Carbono en una plantación de banano en la Región Atlántica de Costa Rica*. guácimo, Costa Rica : EARTH.
- Giraldo, D. D., & Pérez, N. D. (2012). *Manual para el cultivo de banano en la zona cafetera*. Rionegro- Antioquia : Universidad Católica de Oriente (UCO) & Federación Nacional de Cafeteros en Colombia, Fondo Nacional del Café .
- Giri, B., Kapoor, R & Mukerji K.G. (2003) Influence of arbuscular mycorrhizal fungi and salinity on growth, biomass, and mineral nutrition of *Acacia auriculiformis*. *Biol Fertil Soils* 38:176–18
- Girvan, M.S., Bullimore, J., Ball, A.S., Pretty, J.N & Osborn, A.M. (2004). Responses of active bacterial and fungal communities in soils under winter wheat to different fertilizer and pesticide regimens. *Appl. Env. Microbiol.* 70: 2692-2701.
- González-Chávez, M., Gutiérrez-Castorena, M., & Wrigh, S. (2004). Hongos micorrízicos arbusculares en la agregación del suelo y su estabilidad. *Terra Latinoamericana*, vol. 22, núm. 4, octubre-diciembre, pp. 507-514.

- Grace, J.B. (2006). Structural equation modeling and natural systems. Universidad de Cambridge, New York, EEUU.
- Gualdrón, C., Suárez, A. L., & Valencia, H. (1997). Hongos del suelo aislados de zonas de vegetación natural del páramo de Chisacá, Colombia. *Caldasia*, Vol 19, (1-2), 235-245.
- Guerrero, R. (2004). Propiedades generales de los fertilizantes. Manual técnico. Monómeros Colombo-Venezolanos, Barranquilla. 46 p.
- Gulati, A., Sharma, N., Vyas, P., Sood, S., Rahi, P., Pathania, V & Prasad, R. (2010) Organic acid production and plant growth promotion as a function of phosphate solubilization by *Acinetobacter rhizosphaerae* strain BIHB 723 isolated from the cold deserts of the trans-Himalayas. *Arch Microbiol* 192:975–983
- Guzmán-Plazola, RA.; Ferrera-Cerrato R & Etchevers, JD. (1988). *Leucaena leucocephala*, a plant of high mycorrhizal dependence in acid soils. *Leucaena Res. Rep.* 9: 69-73
- Gyaneshwar, P., James, EK., Reddy, P.M & Ladha, JK. (2002a). *Herbaspirillum* colonization increases growth and nitrogen accumulation in aluminium tolerant rice varieties. *New Phytol* 154:131–146
- Gyaneshwar, P., Kumar, G.N., Parekh, L.J & Poole, PS. (2002b). Role of soil microorganisms in improving P nutrition of plants. *Plant Soil* 245:83–93
- Habte, M., & Osorio, N.W. (2001). Arbuscular mycorrhizas: producing and applying arbuscular mycorrhizal inoculum. *Collage of tropical agriculture and human resources*. University of Hawaii, Manoa, pp 15–23
- Hameeda, B., Harini, G., Rupela, OP., Wani, SP & Reddy, G. (2008). Growth promotion of maize by phosphate-solubilizing bacteria isolated from composts and macrofauna. *Microbiol Res* 163:234–242
- Henao, C. B., & Vanegas, S. C. (2008). *Aislamiento y Producción de Bacterias fosfato solubilizadoras a partir de compost obtenido de residuos de plaza*. Bogotá D.C: Facultad de Ciencias, Pontificia Universidad Javeriana .

- Hendrix, J.W., Guo, B.Z & Z-Q, A.N. (1995). Divergence of mycorrhizal fungal communities in crop production systems. In: H.P. Collins, G.P. Robertson & M.J. Klug (eds), the significance and regulation of soil biodiversity, p. 131-140. Kluwer academic publishers. Netherlands
- Hinsinger, P. (2001). Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review. *Plant Soil* 237: 173-195.
- Hoz, J. V. (2008). *Banano y revaluación en el departamento del Magdalena 1997- 2007*. Cartagena de Indias: Economía Regional. Banco de la República. Centros de estudios económicos regionales (CEER). .
- Huang, P., M. Wang & Chiu, C. (2005). Soil mineral-organic matter-microbe interactions: Impacts on biogeochemical processes and biodiversity in soils. *Pedobiology* 49: 609-635.
- IGAC. (Junio de 2015). *Laboratorio de Suelos* . Recuperado el 24 de Junio de 2015, de Instituto Geográfico Agustín Codazzi: [http://www.igac.gov.co/wps/portal/igac/raiz/iniciohome/tramites!/ut/p/c4/04\\_SB8K8xLLM9MSSzPy8xBz9CP0os3hHT3d\\_JydDRwN3t0BXA0\\_vUKMwf28PI4NQI\\_2CbEdFAJ67NCc!/?WCM\\_PORTLET=PC\\_7\\_AIGOB1A08AGF0ISG6J8NS3000\\_WCM&WCM\\_GLOBAL\\_CONTEXT=/wps/wcm/connect/Web++Tramites+y](http://www.igac.gov.co/wps/portal/igac/raiz/iniciohome/tramites!/ut/p/c4/04_SB8K8xLLM9MSSzPy8xBz9CP0os3hHT3d_JydDRwN3t0BXA0_vUKMwf28PI4NQI_2CbEdFAJ67NCc!/?WCM_PORTLET=PC_7_AIGOB1A08AGF0ISG6J8NS3000_WCM&WCM_GLOBAL_CONTEXT=/wps/wcm/connect/Web++Tramites+y)
- INIAP. Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias. [iniap-ecuador.gov.co](http://www.iniap-ecuador.gov.co). Web. 10 de febrero de 2008. <<http://www.iniap-ecuador.gov.ec>>
- INVAM. (20 de Marzo de 2015). *International culture collection of (Vesicular) Arbuscular Mycorrhizal Fungi*. Recuperado el 10 de Junio de 2015, de <http://invam.wvu.edu/>
- Jackson, N.E., Franklin, R & Miller, R. (1972). Effects of vesicular arbuscular mycorrhizae and growth and phosphorus content of three agronomic crops. *Soil Microbiology and Biochemistry* 36. 64-68
- Jaramillo, I. R. (2011). La micorriza arbuscular (MA) centro de la rizosfera: comunidad microbológica dinámica del suelo. *Depto. de Biología, División de CBS. UAM-Iztapalapa*, 17-23.

- Jisha, M.S & Alagawadi AR. (1996). Nutrient uptake and yield of sorghum [(*Sorghum bicolor* (L.) Moench)] inoculated with phosphate solubilizing bacteria and cellulolytic fungus in a cotton stalk amended vertisol. *Microbiol Res* 151:213–217
- Johnson, N., Tilman, D & Wedin, D. (1992). Plant and soil control son mycorrhizal fungal communities. *Ecology* 73:2034-2042
- Jurado, R. & Vargas, A. (1977). Discusión de los resultados de algunos análisis de suelos de la zona bananera de Urabá, Antioquia. *Revista Augura* 2(7), 11-21.
- Kalra, Y. P. (1998). *Handbook of Reference Methods for Plant Analysis* . CRC Press; Taylor & Francis Group, LLC .
- Khan, MS., Zaidi, A. & Wani, PA. (2007). Role of phosphate-solubilizing microorganisms in sustainable agriculture—a review. *Agron Sustain Dev* 27:29–43
- Khan, M.S., Zaidi, A., Ahemad, M., Oves, M & Wani, P. (2010). Plant growth promotion by phosphate solubilizing fungi-current perpestive. *Archives of Agronomy and Soil Science, Vol. 56(1), 73-96*
- Khan, M. S., Zaid, A., Ahemad, M., Oves, M., & Wani, P. A. (2010). Plant growth promotion by phosphate solubilizing fungi – current perspective. *Taylor & Francis. Archives of Agronomy and Soil Science Vol. 56, No. 1, 73–98.*
- Kohler, J., Caravaca, F., Carrasco, L & Roldán, A. (2007). Interactions between a plant growth-promoting rhizobacterium, an AM fungus and a phosphate-solubilising fungus in the rhizosphere of *Lactuca sativa*. *Appl Soil Ecol* 35:480–487
- Kurle, J.E & Pflieger, F.L. (1994). The effects of cultural practices and pesticides on VAM fungi. In: F.L. Pflieger & R.G Linderman (eds.), *Mycorrhizae and plant health*. Pp 101-131. APS Press.
- Lahav, E.& Turner. (1992). Fertilización del banano para rendimientos altos. Segunda edición. Boletín N° 7. INPOFOS. Quito, Ecuador. p 71

- Lapeyre, F., Ranger J. & Vairelles, D. (1990). Phosphate - solubilizing activity of ectomycorrhizal fungi in vitro. *Canadian Journal of Botany*, 69: 342-346
- López, A., & Espinosa, J. (1995). *Manual de Nutrición y Fertilización del Banano (Una visión practica del manejo de la Fertilización)*. Quito- Ecuador: (IPNI) International Plant Nutrition Institute- Corporación Bananera Nacional.
- Lovera, M & Cuenca, G. (2007). Diversidad de hongos micorrízico arbusculares (HMA) y potencial micorrízico del suelo de una sábana natural y una sábana perturbada de la Gran Sabana, Venezuela. *Interciencia* 32(2):108-114
- Macías, L. M., Valdés, E. H., García, S. S., Guízar, F. E., & Taylor, V. A. (2002) *Relación entre propiedades físico- químicas del suelo y la concentración nutrimental foliar en plantas de aguacate "Hass"*. XXXVII Congreso Nacional de la Ciencia del suelo
- Mahamuni, S. V., Wani, P. & Patil, A. S. (2012). Insolation of Phosphate solubilization fungi from rhizosphere of sugarcane & sugar beet using tep & Rp solubilization. *Asian Journal of Biochemical and Pharmaceutical Research*, Vol. 2, 237-244.
- Manjunath, A., Hue, NV & Habte, M. (1989). Response of *Leucaena leucocephala* to vesicular-arbuscular mycorrhizal colonization and rock phosphate fertilization in an oxisol. *Plant Soil* 114:127– 133
- Martínez, A., Becerra, J., & Villamil, J. (1997). *Evaluación del Sistema de Producción de Plátano en el Departamento del Meta*. Villavicencio- Meta, Colombia: CORPOICA PRONATA.
- Matiasa, S.R., Paganoa, M.C & Muzzi, F.C. (2009). Effect of rhizobia, mycorrhizal fungi and phosphate-solubilizing microorganisms in the rhizosphere of native plants used to recover an iron ore area in Brazil. *Eur J Soil Biol* 45(3):259–266
- Matson, P.A., Parton, W.J., Power, A.G. & Swift, M.J. (1997). Agricultural intensification and Exosystem properties. *Science*, 277(5325), 504-509.
- McGonigle, T. P., Miller, M. H., Evans, D. G., Fairchild, G. L., & Swan, J. a. (1990). A new method which gives an objective measure of colonization of roots by vesicular-arbuscular

- mycorrhizal fungi. *New Phytologist*, 115(3), 495–501. <http://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1990.tb00476.x>
- Medeiros, C., Clark, R & Ellis, J. (1994). Growth and nutrient uptake of sorghum cultivated with vesicular-arbuscular mycorrhiza isolates at varying pH. *Mycorrhiza* 4, 185-191.
- Mena, J. M., Urina, C. B., & Torres., R. J. (2009). *Buenas Prácticas Agrícolas en el Cultivo del Banano en la Región del Magdalena*. Medellín - Colombia : COMUNICACIONES AUGURA- IMPRESOS S.A.
- Millaleo, R., Montecinos, C., Rubio, R., Contreras, A., & Borie, F. (2006). Efecto de la adición de compost sobre propágulos micorrícicos arbusculares en un suelo volcánico del centro del sur de Chile . *R.C.Suelo Nutr. - J.Soil Sc.Plant. Nutr.* 6 (3) , 26-39.
- Miller, S.P. (2000).. Arbuscular mycorrhizal colonization of semi-aquatic grasses along wide hydrologic gradient. *New Phytol.* 145:145-155
- Mira, J., Díaz, A & Hernández, M. (2004). Influencia del régimen de lluvias sobre la productividad bananera de Urabá. p. 72. En: Memorias. XXXIV Congreso Sociedad Colombiana de Control de Malezas y Fisiología Vegetal. COMALFI, Bogotá.
- Miranda, D., Fischer, G. & Ulrichs, C. (2011). The influence of arbuscular mycorrhizal colonization on the growth parameters of cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.) plants growth in a saline soil. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 11, 18–30.
- Mnyazi, J., Kahangi, E., Losenge, T., Mung'atu, J., Ngului, W., Ichami, S. & Vanluawe, B. (2012). Arbuscular mycorrhizal fungi in the rhizosphere of banana and plantain and the growth of tissue culture cultivars. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 157, 24–31. <http://doi.org/10.1016/j.agee.2012.03.014>
- Molina, S. M. (2009 ). *Efecto de Microorganismos aplicados por fertiriego en la disponibilidad de fósforo en dos sistemas de cultivo de banano en la zona bananera del Magdalena*. Santa Marta- Colombia: Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira.

- Moratto, C., Martínez, L.J., Valencia, H. & Sánchez, J. (2005). Efecto del uso del suelo sobre hongo solubilizadores de fosfato y bacterias diazotróficas en el páramo de Guerrero (Cundinamarca). *Agronomía Colombiana* 23 (2): 229-309.
- Mycobank. (2015). mycobank.org. Obtenido de Paecilomyces lilacinus: <http://www.mycobank.org/name/Paecilomyces%20lilacinus>
- Nahas, E. (1996). Factors determining rock phosphate solubilization by microorganisms isolated from soil. *World J. Microbiol. Biotechnol.* 12: 567–572.
- Narsian, V.T. & Patel H.H. (2009). Relationship of physicochemical properties of rhizosphere soils with native population of mineral phosphate solubilizing fungi. *Indian J. Microbiol.* 49: 60-67.
- Oehl, F., Siverding, E., Mader, P., Dubois, D., Ineichen, K., Boller, T & Wiemken, A. (2004). Impact of long-term conventional and organic farming on the diversity of arbuscular mycorrhizal fungi. *Oecologia* 138:574-583.
- Oehl, F., Redecker, D., & Sieverding, E. (2005). *Glomus badium*, a new sporocarpic mycorrhizal fungal species from European grasslands with higher soil pH. *Journal of Applied Botany and Food Quality* 79, 38 - 43 .
- Oehl, F., Sieverding, E., Palenzuela, J., Ineichen, K., & Silva, G. A. (2011). Advances in Glomeromycota taxonomy and classification. *IMA FuNgus · volumen 2 · No 2*, 191–199.
- Oehl, F., Silva, G. A., Goto, B. T., & Sieverding, E. (2011). Glomeromycota: three new genera and glomoid species reorganized. *MYCOTAXON. Volume 116, April–June* , pp. 75–120 .
- Oliveira, A., Oliveira, L., & Figueiredo, A. (2003). Arbuscular mycorrhizal colonization and nutrient concentration of three cultivars of banana on a Central Amazonian Oxisol. *Acta Amaz.* 33, 345–352.
- Orozco, I. M., Sarmiento, C. V., Gutiérrez, M. C., & Andrade, J. C. (2010). Colonización micorrizica en plantas de Aguacate (*Persea americana* L.). *Revista U.D.CA Act. & Div. Cient.* 13 (2), 51-60 .

- Ortega, D. O. (2009). *Efecto de la poda temprana y la aplicación de un Bioestimulante en el cultivo de banano (Musa acuminata AAA) , sobre la incidencia de la Sigatoka negra (Mycosphaerella fijiensis M) . Santo Domingo : Escuela Politecnica del Ejército- Carrera de Ingeniería en Ciencias Agropecuarias .*
- Osorio, N.W. & Habte, M. (2001). Synergistic influence of an arbuscular mycorrhizal fungus and a P solubilizing fungus on growth and P uptake of *Leucaena leucocephala* in an Oxisol. *Arid Land Res. Manag.* 15: 263-274.
- Osorio, C. E., Sánchez, D.A, & Molano, A. E. (2008). Multiplicación de Hongos Micorriza Arbuscular (H.M.A) y efecto de la Micorrización en plantas micropropagadas de banano (Musa AAA cv. Gran Enano) (Musaceae). *Revista Facultad Nacional de Agronomía-Medellín, vol. 61, núm. 1.*, 4279- 4290.
- Osorio, C. E., Sánchez, D.A., Molano, A.E., Velásquez, F. A & Agudelo, C.A. (2008). Efecto de la Micorrización y la Fertilización en la acumulación de Biomasa en plantas de banano (Musa AAA cv. Gran enano) (Musacea). *Revista Facultad Nacional Agronomía-Medellín, vol. 61, núm. 1*, 4269- 4278.
- Ospina, O. (2000). El yeso (sulfato de Ca ) como fertilizante y enmienda de suelos. Cales Río Claro, Apartadó, Colombia. 68 p.
- Pérez, E., Sulbaran, M., Ball, M. & Yarzabal, L.( 2007). Isolation and characterization of mineral phosphate-solubilizing bacteria naturally colonizing a limonitic crust in the south-eastern Venezuelan region. *Soil. Biol. Biochem* 39: 2905-2914.
- Pérez, C.A., & Peroza, C.V. (2010). Efecto de parámetros físicos, químico y salinidad sobre la densidad poblacional y la colonización de micorrizas arbusculares en pasto angletón en el municipio de Tolú, Sucre, Colombia. *Rev. Colombiana cienc. Anim.* 2(2):312-324. Disponible en: [http://www.recia.edu.co/documentosrecia/vol2num2/A\\_7\\_ORIGINAL\\_MICORRIZAS\\_VICTOR.pdf](http://www.recia.edu.co/documentosrecia/vol2num2/A_7_ORIGINAL_MICORRIZAS_VICTOR.pdf).

- Peterson, R.L., Massicote, H & Melville, L. (2004). *Mycorrhizas: Anatomy and Cell Biology*. Ottawa: NRC Research press.
- Piccini, D. & Azcon R. (1987). Effect of phosphate solubilizing bacteria and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi on the utilization of Bayovar rockphosphate by alfalfa plants using a sand-vermiculite medium. *Plant Soil* 50:45–50
- Picone, L.I & Zamuner, E. (2002). Fósforo orgánico y fertilidad fosfórica. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur* 16: 11-15
- Porras-Soriano, A., Soriano-Martín, M.L., Porras-Piedra, A. & Azcón, R. (2009). Arbuscular mycorrhizal fungi increased growth, nutrient uptake and tolerance to salinity in olive trees under nursery conditions. *J. Plant Physiol.* 166, 1350–9. doi:10.1016/j.jplph.2009.02.010
- Posada, R. H., Prager, M. S., Sieverding, E., Dorantes, K. A., & Abarca, G. P. (2012). Relaciones entre los hongos filamentosos y solubilizadores de fosfatos con algunas variables edáficas y el manejo de cafetales. *Revista de Biología Tropical*, vol. 60, núm. 3, 1075-1096.
- Pradhan, N., & Sukla, L. (2005). Solubilization of inorganic phosphates by fungi isolated from agriculture soil. *African Journal of Biotechnology* Vol. 5 (10), 850-854.
- Prager, M. S., Almanza, R. P., Pomar, D. V., & Castillo, M. N. (2010). *Metodologías Básicas para el trabajo con Micorriza arbuscular y Hongos formadores de micorriza arbuscular*. Palmira, Colombia : Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira.
- Puente, ME., Li, CY & Bashan, Y. (2004). Microbial populations and activities in the rhizoplane of rock-weathering desert plants. II. Growth promotion of cactus seedlings. *Plant Biol* 6:643–650
- Pulido, D. P., & Niño, J. S. (2015). *Aislamiento y evaluación de Hongos solubilizadores de fosfato asociados al sistema productivo de banano (Musa paradisiaca) en zonas de los departamentos de Magdalena, Antioquia, Cundinamarca, Colombia*. Bogotá D.C: UNIMINUTO .

- Rao, S. (1992). Biofertilizers in agriculture. AA Balkema, Rotterdam, p 188
- Requena, N., Serrano, E., Ocón, A & Breuninger, M. (2007). Plant Signals and Fungal Perceptions during Arbuscular Mycorrhizal Establishment. *Phytochemistry*. 68:33-4.
- Reyes, A. (1995). Influencia de micorrizas y de una bacteria solubilizadora de fosfatos en el crecimiento y desarrollo de plantas micropropagadas de banano. *Infomusa* 9–10.
- Rhoades, J. D. (1982). Cation exchange capacity. In: Page AL, Miller RH, Keeney DR (eds) *Methods of soil analysis, Part 2, Vol 9, 2nd edn. American Society of Agronomy, 9, 149–158.*
- Rietz, D.N & Haynes, R.J. (2003). Effects of irrigation induced salinity and sodicity on soil microbial activity. *Soil Biol Biochem* 35:845– 854
- Rigde, E & Rovira, A. (1971). Phosphatase activitt of intact young wheat roots under sterile and non-sterile conditions. *New Phytol.* 70: 1017-1026
- Rinu, K., & Pandey, A. (2011). Slow and steady phosphate solubilization by a psychrotolerant strain of *Paecilomyces hepiali* (MTCC 9621). *World J Microbiol Biotechnol* 27, 1055–1062.
- Rivas, G. & Rosales, F. (2003). Manual Convencional y alternativo de la Sigatoka negra, nematodos y otras plagas asociadas al cultivo de Musáceas en los trópicos. Ecuador: INIBAP Y MUSALAC.
- Robinson, J.C & Alberts, A. J. (1989). Seasonal variation in the crop water-use coefficient of banana (cultivar "Williams") in the subtropics. *Scientia Horticulturae* 40: 215-225.
- Rodríguez, T., Nieves, J. S., Melgarejo, L. M., & Muñoz, M. C. (2009). Efecto de la inoculación con Hongos formadores de micorrizas arbusculares sobre plántulas de Caucho. *Acta biol. Colomb., Vol. 14 N.º 3, 31 - 46.*

- Rodríguez, I; Crespo, G & Rodríguez, C. (2002). Comportamiento de la macrofauna del suelo en pastizales con gramíneas naturales puras o intercaladas con *Leucaena leucocephala* para la caba de toros. *Revista Cubana Ciencia Agrícola*, 36(2): 181-185.
- Ruiz-Lozano JM, Azcón R. (2000). Symbiotic efficiency and infectivity of an autochthonous arbuscular mycorrhizal *Glomus* sp. From saline soils and *Glomus deserticola* under salinity. *Mycorrhiza* 10:137–143
- Ryan, M., Chilvers, G & Dumaresq, D. (1994). Colonization of wheat by VA- mycorrhizal fungi was found to be higher on a farm managed in an organic manner than on a conventional neighbour. *Plant and Soil* 160, 33-44
- Sahin, F., Cakmakci, R & Kantar, F. (2004). Sugar beet and barley yields in relation to inoculation with N<sub>2</sub>-fixing and phosphate solubilizing bacteria. *Plant Soil* 265:123–129
- Sánchez, L. R., Espinosa, R. R., Cardenas, J. V., Puig, A. C., & Hernández, A. T. (2011). Utilización de cepas eficientes de Hongos micorrizicos arbusculares en el desarrollo de portainjertos de aguacate en un sustrato sueño- cachaza. *Cultivos Tropicales*, vol. 32, no. 2. *Ministerio de Educación Superior. Cuba. Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas (INCA)*, p. 23-29 .
- Sánchez, J., Valencia, H., & Valero, N. O. (2005). Producción de ácido indolacético por microorganismos solubilizadores de fosfatos presentes en la rizósfera de *Espeletia grandiflora* y *Claramagrostis effusa* del páramo El Granizo. En U. N. Colombia, *Estrategias Adaptativas de plantas del páramo y del bosque altoandino en la cordillera oriental de Colombia* (págs. 177-193). Bogotá- Colombia : UNIBIBLOS. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias.
- Sánchez de Prager, M., Posada Almanza, R. H., Velásquez Pomar, D., & Narvaez Castillo, M. (2010). *Metodologías básicas para el trabajo con micorriza arbuscular y hongos formadores de micorriza arbuscular* (1st ed.). Palmira: Universidad Nacional de Colombia

- Sánchez, D. A. (2011). *Evaluación de métodos estadísticos para el desarrollo de una propuesta de manejo por sitio específico para banano*. Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agrarias.
- Schalamuk, S., Velasquez, S., Chidichimo, H & Cabello, M. (2006). Fungal spore diversity of arbuscular mycorrhizal fungi associated with spring wheat: effects of tillage. *Mycologia* 98(1):16-22
- Sieverding, E. (1984). *Aspectos básicos de la investigación de la micorriza vesículo-arbuscular (MVA)*. Primer Curso Nacional sobre Micorrizas. Facultad de Ciencias Agropecuarias-Palmira. Memórias. p. 86-87.
- Sieverding, E. (1991). Vesicular arbuscular mycorrhizal management in tropical agrosystems. Germany, GTZ. Eschborn. 199
- Singh, S, & Kapoor K.K. (1999). Inoculation with phosphate-solubilizing microorganisms and a vesicular-arbuscular mycorrhizal fungus improves dry matter yield and nutrient uptake by wheat grown in a sandy soil. *Biol Fertil Soils* 28:139–144
- Six, J., Bossuyt, H., Degryze, S. & Deneff, K. (2004). A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil Tillage Res.* 79, 7–31.
- Six, J., Frey, S.D., Thiet, R.K.& Batten, K.M. (2006). Bacterial and fungal contributions to carbon sequestration in agroecosystems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70, 555–569.
- Smith, S.E., Dickson, S., Morris, C & Smith, F.A. (1994). Transfer of phosphate from fungus to plant in VA mycorrhizas: calculation of the área of symbiotic interface and of fluxes of P from two different fungi to *Allium porrum* L. *New Phytologist* 127, 93-99.
- Smith, S.E & Read D.J. (2008). *Mycorrhizal Symbiosis*. 3rd ed. Elsevier, New York, USA.
- Smith, S.E. & Read, D.J. (1997). *Mycorrhizal symbiosis*. New York, Academic Press. 605 p.
- Soto, M. (1998). *Bananos, Cultivo y Comercialización*. Editorial LIL, S.A. Segunda Edición. Costa Rica. pp. 56 – 61, 136 – 168, 230 – 294.

- Soto, M. (2001). Bananos, cultivo y comercialización. Litografía e Implante Lil., Costa Rica. 1985 p.
- Soto, M. (2002). Bananos: Cultivo y comercialización. Edición Digital. San José, Costa Rica. 790 pp
- Spain, J. L., Sieverding, E., & Oehl, F. (2006). Appendicispora: a new genus in the arbuscular mycorrhiza-forming Glomeromycetes, with a discussion of the genus Archaeospora. *MYCOTAXON. Volume 97*, pp. 163–182.
- Steenwert, .L., Jackson, L.E., Calderon, F.J., Stromberg, M.R & Scow, K.M. (2002). Soil microbial community composition and land use history in cultivated and grassland ecosystems of coastal California. *Soil Biology & Biochemistry*, 34(11), 1599-1611.
- Sundara, R. & M. Sinha. (1963). Organisms phosphate solubilizers in soil. *Indian J. Agric. Sci.* 33: 272-278.
- Sylvia, DM.,Hammond, LC., Bennett, JM., Haas JH & Linda SB. (1993). Field response of maize to a VAM fungus and water management. *Agron. J.* 85: 193-198.
- Tao, GC., Tian, S.J., Cai, M.Y & Xie G.H. (2008). Phosphate-solubilizing and mineralizing abilities of bacteria isolated from soils. *Pedosphere* 18:515–523
- Taurian, T., Anzuay, M.S, Angelini, J.G., Tonelli, M.L., Luduena, L., Peña, D., Inanez, F & Fabra, A. (2010). Phosphate-solubilizing peanut associated bacteria: screening for plant growth-promoting activities. *Plant Soil* 329:421–431
- Toledo, G. T., & Aguilar, C. F. (1997). *Contenido nutricional y absorción de nutrientes en plantas de banano (Musa AAA), subgrupo "Cavendish", clon "Gran enano" en diferentes etapas fenológicas de desarrollo*. Guácimo, Costa Rica : Escuela de Agricultura de la Región Tropical Humeda (EARTH).
- Torres, M. & Lizarazo, L. (2006) Evaluación de grupos funcionales (C, N, P) y actividad de la fosfatasa acida en dos suelos agrícolas del departamento de Boyacá (Colombia). *Agronomía Colombiana* 24(2): 317- 325.

- Torres, S. (2012). *Guía práctica para el manejo de banano orgánico en el Valle de Chira*. Piura- Perú: Athenea, Comunicación y Cultura.
- Tripathi, S., Kumari, S., Chakraborty, A., Gupta, A., Chakrabarti, K & Bandyopadhyay BK. (2006). Microbial biomass and its activities in salt-affected coastal soils. *Biol Fertil Soils* 42:273–277
- Turner, D.W., Fortescue, J.A & Thomas, D. (2007). Environmental physiology of the bananas (*Musa* spp.). *Brazilian Journal of Plant Physiology* 19(4): 463-484.
- Usuga Osorio, C.E., Castañeda, D., Franco, A., Gómez, F., Lopera, C., (2008a). Efecto de la micorrización y la fertilización en la acumulación de biomasa en plantas de banano (*Musa* AAA cv. Gran Enano) (Musaceae). *Rev. la Fac. Agron. Medellin* 61, 4269–4278.
- Usuga Osorio, C.E., Castañeda Sánchez, D.A., Franco Molano, A.E., (2008b). Multiplicación de hongos micorriza arbuscular (H.M.A.) y efecto de la micorrización en plantas micropropagadas de banano (*Musa* AAA cv. Gran Enano)(Musaceae). *Rev. la Fac. Agron. Medellin* 61, 4279–4290
- Vaidya, G.S., Shrestha, K., Khadge, B.R., Johnson, N & Wallander, H. (2008). Organic matter stimulates bacteria and arbuscular mycorrhizal fungi in *Bauhinia purpurea* and *Leucaena diversifolia* plantations on eroded slopes in Nepal. *Restor. Ecol.* 16: 79-87.
- Vallejo, G.G. (1997). Factores que afectan la productividad del cultivo del banano en Urabá y sugerencias para su mejoramiento. p. 107. En: *Memorias. Seminario manejo integral y sostenible de la fertilización en banano, buscando competitividad mundial y rentabilidad.* Apartadó, Antioquia.
- Van Raíj, B., Cantarella, H., Quaggio J.A & Prochnow, L. (2009). Ion Exchange resin for assesing phosphorus availability in soils. *Better Crops* 93 (1):23-25
- Vaquero, R. (2003). Soil physical properties and banana root growth. *In*: Turner, D & F Rosales (*eds*). *Proceedings Banana root system: toward a better understanding for its productive management.* Pp. 125-131. Inibap, Musalac, Corbana. San José de Costa Rica. 261 pp.

- Vargas, A & Villamizar, D. (2005). Estudio preliminar de la producción, extracción y purificación de T2 toxina por *Fusarium sporotrichioides* NRRL 3299 en dos medios sintéticos. *Microbiólogo Industrial*. Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de Ciencias. Bogotá D.C. 172 pg.
- Vassilev, N. & Vassileva M. (2003). Biotechnological solubilization of rock phosphate on media containing agroindustrial wastes. *Appl Microbiol Biotechnol* 61:435–440
- Velandia, D. L. (2006). *Evaluación y caracterización de Micorrizas arbusculares asociadas a Yuca (Manihot esculenta sp) en dos regiones de la amazonía colombiana*. . Bogotá D.C- Colombia : Pontificia Universidad Javeriana- Facultad de ciencias .
- Velásquez, F. A., Osorio, C. E., & Molano, A. E. (2006). Evaluación del recurso micorrizal en ecosistema natural y agroecosistema bananero del Urabá-Antioquia, Colombia. *POLITÉCNICA No. 3 Medellín*, 41-48.
- Vera, D. F., Pérez, H., & Valencia, H. (2002a). Aislamiento De Hongos Solubilizadores De Fosfatos De La Rizosfera De Arazá (*Eugenia stipitata*, Myrtaceae) (U. N. Facultad de Ciencias, Ed.) Bogotá, Colombia: *Acta Biológica de Colombiana*, Vol. 7 N° 1, 33-40
- Vera, D. F., Pérez, H., & Valencia, H. (2002b). Distribución de hongos solubilizadores de fosfatos en dos microhabitats de suelo de dos unidades fisiográficas de Guaviare, Colombia. *Acta Biológica Colombiana*, Vol. 7 No. 1, (págs. 23- 31).
- Vierheilig, H.; Coughlan, A.; Wyss, U. & Piche, Y. (1998). Ink and Vinegar, a Simple Staining Technique for Arbuscular-Mycorrhizal Fungi. *Applied And Environ. Microbiol.* Volumen 64 (12):5004–5007 p.
- Villarreal, T. C., Medina, M. E., & Ulloa., S. (2012). *Efecto de Hongos micorrícicos arbusculares (HMA) y Azospirillum sobre el crecimiento y nutrición de plántulas de banano micropropagadas durante su fase de aclimatación*. BIOTECNOLOGÍA / SANGOLQUÍ/ ESPE.

- Walkley, A., & Black, I. A. (1934). An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37(1), 29–38.
- Wang, G.M., Stribley, D.P., Tinker, P.B & Walter C. (1993). Effects of pH on Arbuscular Mycorrhizal. I. Field Observations on the Long-Term Liming Experiments at Rothamstead and Woburn. *New Phytol.* 124(3):465-472.
- Willard, H., Merritt, L. L., & Dean, J. A. (1974). *Instrumental Methods of Analysis* (5th ed.). New York.
- Wu, Y., B. Ma, L. Zhou, H. Wang, J. Xu, S. Kemmitt & P.C. Brookes. 2009. Changes in the soil microbial community structure with latitude in eastern China, based on phospholipid fatty acid analysis. *Appl. Soil Ecol.* 43: 234-240.
- Yao, H., He, Z., Wilson, M.J & Campbell, C.D. (2000). Microbial biomass and community structure in a sequence of soils with increasing fertility and changing land use. *Microbial Ecology*, 40(3), 223-237.
- Yano-Melo, A.M., Saggin, O.J., Costa Maia, L. (2003). Tolerance of mycorrhized banana (*Musa* sp. cv. Pacovan) plantlets to saline stress. *Agric. Ecosyst. Environ.* 95, 343–348. doi:10.1016/S0167-8809(02)00044-0
- Zhang, P., J. Zheng, G. Pan, X. Zhang, L. Li & T. Rolf. (2007). Changes in microbial community structure and function within particle size fractions of a paddy previous termsoil under different long-term fertilization treatments from the Tai Lake region, China. *Colloid. Surf. B: Biointerfaces* 58: 264-270.
- Zhang, H., Wu, X., Li, G., & Qin, P. (2011). Interactions between arbuscular mycorrhizal fungi and phosphate-solubilizing fungus (*Mortierella* sp.) and their effects on *Kosteletzkya virginica* growth and enzyme activities of rhizosphere and bulk soils at different salinities. *Biol Fertil Soils* 47. *Springerlink.com*, 543–554.

## ANEXOS.

**Anexo 1.** Composición del medio de cultivo Sundara & Sinha (S&S).

COMPUESTO	CANTIDAD/L
$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	0.5g
KCl	0.2g
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.3g
$\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	0.004g
$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.002g
NaCl	0.2g
Glucosa	10g
Extracto de levadura	0.5g
Agar	18g
$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$	0.5g
Agua	900 ml

**Anexo 2.** Datos fisicoquímicos de los muestreos de suelo y foliar, colonización de la raíz.

FINCA	MUESTRA	ARENA	LIMO	ARCILLA	ph	CO	CIC	Ca	Mg	K	Na	P Disponible	PTotal	ColHMA	Fósforo foliar	Humedad	HSP
CAMPO ALEGRE	1	55	28,6	16,4	4,5	10	46,4	0,6	0,3	0,79	0,33	29,9	924	45,25	0,13	33,5	5
CAMPO ALEGRE	2	55	28,6	16,4	4,1	11	47	0,8	0,4	0,64	0,15	21,3	770	52,5	0,16	29,1	6
CAMPO ALEGRE	3	47,4	32,4	20,2	4,3	5,9	30,5	0,9	0,6	0,78	0,18	177	954	13,25	0,18	30,3	5
CAMPO ALEGRE	4	47,4	32,4	20,2	4,8	8	27,8	4,1	1,3	0,81	0,14	18,3	680	25,25	0,12	31	4
CAMPO ALEGRE	5	49,8	28	22,2	4,2	6	31,9	0,5	0,2	0,46	0,11	31,5	790	27,75	0,15	34,2	5
CAMPO ALEGRE	6	49,8	28	22,2	4,2	5,6	28,9	1,6	0,3	0,86	0,15	52,6	1060	33,5	0,16	26,5	4
EL RECUERDO	7	57,8	27,6	14,6	4,3	10	59,9	4,2	1,6	2,4	0,77	781	2250	14	0,12	24,8	3
EL RECUERDO	8	22,6	53	24,1	3,8	3,3	27	1,5	0,7	1,3	0,63	446	1566	20,5	0,1	26,1	4
EL RECUERDO	9	53,6	29,7	16,7	4,7	7,8	46,1	1,5	0,5	0,76	0,11	17,3	950	17,25	0,16	21,1	3
EL RECUERDO	10	48,1	33,4	18,5	4,9	6	38,6	1,8	0,8	0,78	0,17	14,2	430	23,5	0,12	11,9	2
EL RECUERDO	11	56	29,5	14,5	4,5	7,8	50,6	2,1	1,2	2	0,59	52,2	1198	19,75	0,12	20,6	3
EL RECUERDO	12	48,5	37,2	14,3	5,1	4,7	41,9	1,5	0,7	0,74	0,25	11,6	246	15,5	0,11	15,7	2
LOS BOHIO, ROSAS Y SERAFINES	13	25,7	35	39,3	5,3	3,2	40,6	4,5	0,9	1,2	0,26	40,3	2820	15,75	0,14	28,8	2
LOS BOHIO, ROSAS Y SERAFINES	14	36,3	25,3	38,4	5,3	10	62,7	7,6	1,5	1,9	0,18	282	2465	27,5	0,14	38,4	3
LOS BOHIO, ROSAS Y SERAFINES	15	20,4	38,7	40,9	4,9	2,2	27,7	1,5	0,3	0,67	0,2	13,4	550	17	0,12	22,7	103 2

LOS BOHIO, ROSAS Y SERAFINES	16	19,3	33	47,7	4,9	5,9	44,8	5,4	1	1,2	0,14	26,3	1014	20,25	0,13	30,9	1
LOS BOHIO, ROSAS Y SERAFINES	17	17,6	41,2	41,2	5	2,4	27,9	4,2	1,6	0,54	0,74	145	734	27,25	0,19	20,8	2
LOS BOHIO, ROSAS Y SERAFINES	18	19,1	37,3	43,6	5,2	6,1	39,3	5,9	1,5	1,3	0,31	363	2455	23,75	0,13	26,2	1
SAN ENRIQUE	19	17,7	34,6	47,7	6,4	6,1	46	10	2,4	2,2	0,44	256	1590	21,25	0,1	30,7	1
SAN ENRIQUE	20	17,8	30,7	51,5	4,8	4,4	35,8	4,2	0,9	0,58	0,17	46,5	1500	18,5	0,11	32,7	2
SAN ENRIQUE	21	24,1	28,5	47,4	4,6	5,3	38,4	2,1	0,8	0,58	0,12	57,8	1426	28,25	0,16	24,8	1
SAN ENRIQUE	22	29,5	32,9	37,6	5	6,5	38,3	1,5	0,3	0,42	0,13	23,1	1660	29,25	0,3	31,6	0
SAN ENRIQUE	23	29,5	29	41,5	4,9	5,4	34,7	2,1	0,5	0,5	0,19	99,1	2415	32,5	0,22	28,6	1
SAN ENRIQUE	24	18,9	30	51,1	4,9	3,5	28,7	3,3	0,8	0,8	0,15	48,6	1080	20,25	0,35	21,5	0
MAKAIRA	25	36,2	44	19,8	4,4	0,9	18,2	3,7	1,1	1,9	0,25	160	675	21,25	0,12	23,7	2
MAKAIRA	26	58,9	27,5	13,6	5	0,5	15,8	3,8	0,8	1,2	0,3	70	458	15,25	0,14	19,5	3
MAKAIRA	27	28	48,1	23,9	4,4	0,8	18,6	2,6	1,3	2	0,36	31,5	497	20	0,08	21,4	2
MAKAIRA	28	30,2	47,9	21,9	5,5	0,8	17,4	3,2	1,5	2,1	0,32	21,8	329	19	0,14	25,5	1
MAKAIRA	29	38,325	41,88	19,8	5,3	0,9	17,8	3,8	0,7	2,1	0,15	292	1072	15,5	0,13	19,1	2
MAKAIRA	30	38,1	46,1	15,8	5,3	0,7	20	4,9	1,6	1,4	0,22	51,1	461	10	0,13	26,3	1
LAS VICTORIAS	31	44,2	31,8	24	7,7	1,3	22,9	19	1,9	2,1	0,29	135	693	13,5	0,12	23,3	2
LAS VICTORIAS	32	11,8	40,8	47,4	4,8	1,4	31,2	6,2	1,6	1,8	0,55	20,9	603	13,25	0,13	35,3	3
LAS VICTORIAS	33	25,1	39,7	35,2	5,6	1,1	28,8	6,7	2,6	1,9	0,41	168	509	14	0,13	25,1	2
LAS VICTORIAS	34	40,3	39,2	20,5	6	1,2	20,9	4,5	1,9	2,1	0,3	33,3	359	7,25	0,14	24	1
LAS VICTORIAS	35	11,8	38,2	50	5,2	1,8	35,8	4,6	1,4	2,2	0,55	177	1142	8,5	0,09	32,9	2

LAS VICTORIAS	36	13,4	42,6	44	4,3	1	32,6	5,4	1,5	1,3	0,33	144	822	22,5	0,12	30,1	1
LAS VEGAS	37	11,6	39	49,4	4,4	1	32,2	4,1	1,7	2	0,27	50,5	802	12	0,15	31,2	0
LAS VEGAS	38	27,4	44,5	28,1	4,3	0,6	21,7	3,1	1,4	2,4	0,18	64,3	550	7,75	0,12	25,3	1
LAS VEGAS	39	31,3	36,4	32,3	4,6	1	23,5	3,3	1,5	2,4	0,58	41,9	631	26,25	0,15	27,2	0
LAS VEGAS	40	11,8	38,3	49,4	4,6	1,1	31,9	6	1,6	1,2	0,3	33,1	442	19	0,16	27,3	0
LAS VEGAS	41	12,2	42,2	45,6	5,2	2	33,6	4,5	1,7	2,2	0,16	70,1	783	7,75	0,16	33,7	0
LAS VEGAS	42	12,6	50,3	37,1	5,3	1,2	25,9	5,2	1,6	1,7	0,37	61,5	409	10,25	0,12	27,3	0
DALLAS	43	32,9	49	18,1	4,8	1,3	22,5	4	1	2,1	0,24	124	998	14,5	0,12	26,3	3
DALLAS	44	37,3	48,8	13,9	5	0,6	19,7	4,8	1,3	2	0,22	82,4	537	11,5	0,11	21,9	4
DALLAS	45	41,4	42,6	16	5,1	0,7	19,4	4,4	1,1	1,5	0,18	51,2	453	35,25	0,12	20,5	3
DALLAS	46	33,4	52,7	13,9	4,5	0,8	20,6	3,6	1,4	2,1	0,27	81,4	697	7,33333	0,01	23,7	3
DALLAS	47	37,2	46,8	16	4,5	1,1	21,8	3,6	1,2	1,4	0,41	91,6	771	21,25	0,12	26	3
DALLAS	48	24,4	53,4	22,2	5,7	1,6	24,2	6,1	1,5	4,1	0,3	84,6	685	8,5	0,11	26,8	3
LA LORENA	49	37	44,9	18,1	6,2	2,1	16,4	4,6	1,9	0,87	0,55	411	924	17	0,15	19,9	3
LA LORENA	50	35,7	42,4	21,9	7,4	2,7	20,1	7,6	2	1	0,4	459	1088	11	0,16	25,9	4
LA LORENA	51	26,9	51,1	22	5,5	1,3	14,5	4	1,6	0,59	0,8	145	1040	22,25	0,21	20,5	3
LA LORENA	52	14,9	63,2	21,9	6	2	20,2	4,9	1,3	1,2	1	105	1036	16,75	0,17	25,7	2
LA LORENA	53	23	49	28	5,7	1,2	15	4,8	1,5	0,46	0,69	44,6	638	10	0,13	21,1	3
LA LORENA	54	25,1	52,9	22	5,9	2,1	19,2	5,7	1,4	0,71	0,72	9,7	776	11,5	0,05	23,5	2
LA MARCELA	55	45,9	42,2	11,9	7,4	1,7	15,6	5,6	1,8	1	0,39	218	910	16,5	0,1	17,2	3
LA MARCELA	56	40	42,2	17,8	6,6	2	19,2	5,3	2,9	0,65	1,3	231	752	21	0,11	15,4	4
LA MARCELA	57	33,4	42,6	24	5,2	1,9	22,6	4,7	1,9	0,37	0,43	213	1062	13	0,1	17,8	3
LA MARCELA	58	47,5	42,6	9,9	5,6	1,3	11,7	3,6	1,5	0,66	0,63	50,3	700	15	0,13	10,9	2

LA MARCELA	59	64,2	28	7,8	6,7	1,2	11,1	2,9	2	0,52	0,33	107	856	10,25	0,11	15,5	3
LA MARCELA	60	54,3	35,9	9,8	6,5	1,6	14,6	4,4	1,9	0,68	0,35	114	810	7	0,13	14	2
PUERTO CARREÑO	61	54,1	38,1	7,8	7,4	1,5	12,7	4,9	1,7	1,1	0,55	81,6	928	35,75	0,21	20,4	4
PUERTO CARREÑO	62	50,6	41,6	7,8	6,2	1,5	14,1	4,4	1,1	0,17	0,69	37,4	888	21	0,12	21,5	5
PUERTO CARREÑO	63	42,7	47,5	9,8	7,7	1,4	11,9	8,5	1,9	0,26	1,9	70,8	868	23	0,25	17,4	4
PUERTO CARREÑO	64	19,8	64,4	15,8	8,3	1,8	16,5	6,7	3,8	0,85	1,1	530	1500	20,75	0,26	24	3
PUERTO CARREÑO	65	27,8	58,3	13,9	8	1,5	15,4	8,8	2,5	0,51	1,3	270	1100	18,25	0,15	23,3	4
PUERTO CARREÑO	66	42,4	51,8	5,8	8	1,3	12,7	8,2	1,9	0,74	0,73	469	1770	31	0,48	21,6	3
LA ELOISA	67	42,6	45,6	11,8	5	1,6	16,7	3,6	1,1	0,98	0,35	59,1	1096	13,3333	0,14	21,4	7
LA ELOISA	68	50,6	39,6	9,8	4,4	1,5	12,3	1,7	0,5	0,63	0,29	66,5	856	12,25	0,11	26,5	8
LA ELOISA	69	52,6	39,6	7,8	3,9	1,1	9,9	1,1	0,5	0,73	0,31	107	713	28,25	0,13	14,6	7
LA ELOISA	70	38,8	51,5	9,7	4,9	2,5	19,8	5,1	1,2	0,76	0,34	70,1	924	7,5	0,1	16,4	6
LA ELOISA	71	62,3	29,9	7,8	5	2,1	13,6	3,2	1,1	1,5	0,27	300	1076	21,75	0,23	21,4	7
LA ELOISA	72	42,7	45,5	11,8	6,2	2,6	22,2	5,4	1,9	0,7	0,34	358	1150	18,5	0,2	25,1	6

**Anexo 3.** Cargas factoriales de componentes principales

VARIABLE	FACTOR DE LAS COORDENADAS DE LAS VARIABLES, EN BASE A CORRELACIONES (ACP)							
	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Factor 5	Factor 6	Factor 7	Factor 8
pH	-0,67492	-0,13737	0,42934	-0,34338	0,38013	0,19457	0,18839	0,07418
CIC	0,82888	-0,05217	0,30435	-0,07850	-0,27962	0,18634	0,20513	0,23757
Na	-0,68284	-0,27728	0,43111	-0,05409	-0,40726	0,25638	-0,14075	-0,12900
Limo	-0,66908	-0,60446	-0,17158	0,09743	-0,07088	-0,21928	-0,12889	0,27981
Humedad	0,69115	-0,49439	0,11008	0,07734	0,25908	0,26478	-0,34962	0,01749
Ptotal	0,35521	-0,14220	0,79845	-0,12351	0,01738	-0,43935	-0,06678	-0,05494
Arena	-0,12904	0,86274	0,03686	-0,35400	-0,03764	0,01178	-0,30240	0,13910
K	0,29138	-0,47945	-0,47314	-0,66474	-0,09363	-0,06935	0,003788	-0,07669

Value

Extraction: Principal components

	Eigenvalue	% Total variance	Cumulative Eigenvalue	Cumulative %
1	2,761939	34,52423	2,761939	34,5242
2	1,702703	21,28379	4,464642	55,8080
3	1,367138	17,08922	5,831780	72,8972

